



***DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE E  
DELL'AFFIDABILITÀ***

***UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE***

---

Sede Amministrativa : DIPARTIMENTO DI ENERGETICA – S. STECCO

Settore disciplinare: ING-IND/09

*TESI DI DOTTORATO*

***SISTEMI DI MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI  
DIFFUSE DI BIOGAS DA DISCARICA PER LA  
OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI GESTIONE***

Tutor Universitario:

*Prof. Ing. Ennio A. Carnevale*

Il Coordinatore

*Prof. Ing. Mario Tucci*

Tutor Esterno:

*Prof. Ing. Andrea Corti*

Dottoranda:

***ISABELLA PECORINI***

***ANNO ACCADEMICO 2009/2010 (XXII CICLO)***



---

SISTEMI DI MONITORAGGIO DELLE  
EMISSIONI DIFFUSE DI BIOGAS DA  
DISCARICA PER LA OTTIMIZZAZIONE  
DEL SISTEMA DI GESTIONE

---

---

***ISABELLA PECORINI***

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

GENNAIO 2010

---



*A Renato, Nara e Fabrizio*

*Alla mia famiglia*

---

“L'ESSENTIEL EST INVISIBLE POUR LES YEUX”

**L'ESSENZIALE È INVISIBILE AGLI OCCHI**

---

*Antoine de Saint-Exupéry*

---

“LA PACIENCIA TODO LO ALCANZA”

**LA PAZIENZA OTTIENE TUTTO**

---

*Teresa Sánchez de Cepeda y Ahumada*



## RIASSUNTO

---

Ad oggi dal punto di vista tecnico-normativo non sono fornite precise indicazioni su come valutare le emissioni gassose per gli impianti di discarica. Lo scopo ambizioso del presente lavoro di tesi è quindi prioritariamente quello di sopperire a tale mancanza, e dare impulso, in un settore nel quale le esperienze di metodi di monitoraggio non danno ad oggi un quadro sufficientemente chiaro ed esaustivo, ad uno approccio di collaborazione fra Enti di ricerca, Autorità di Controllo e Associazioni di categoria dei Gestori per stilare un *protocollo di misura condiviso e standardizzato delle emissioni gassose degli impianti di discarica*.

In un'ottica di controllo e quantificazione dei gas climalteranti soprattutto dal punto di vista del mercato delle emissioni risulta necessario individuare una *procedura* di quantificazione delle emissioni diffuse *verificabile e ripetibile*, indipendente dalle condizioni locali e gestionali dell'impianto di discarica di rifiuti urbani.

Secondo quanto premesso è stata condotta, prendendo spunto da una revisione della letteratura scientifica, una analisi comparata in seno ai diversi metodi di misura e controllo delle emissioni diffuse dalle discariche, siano queste emesse in atmosfera o nel terreno, ed in seguito anche della dipendenza della efficacia di tali metodologie al variare delle condizioni meteo-climatiche e i criteri realizzativi e gestionali delle discariche.

Nella presente tesi si vedrà nel dettaglio la metodologia della cosiddetta, "*Camera di accumulo*" definendone i parametri *realizzativi e procedurali*, valutandone l'affidabilità, e applicando il protocollo di monitoraggio così ottenuto a *cinque differenti impianti di discarica*, siti nel territorio toscano.

Dopo una sintetica introduzione normativa e ad una dettagliata spiegazione dei fenomeni degradativi della materia organica, che originano la produzione dei gas di discarica, si vedrà una rassegna dei metodi più usati per valutare le emissioni diffuse, per poi porre attenzione al metodo della *camera di accumulo statica* (CAPITOLO 1).

Fatta una puntuale descrizione dell'apparato strumentale predisposto si è proceduto all'analisi della procedura di misura, studiata in ogni singolo dettaglio, in particolare sono stati eseguiti *test in laboratorio* e *test in situ* per definirne i *parametri* (quali le dimensioni della camera ottimali; il tempo di campionamento; le condizioni operative per il prelievo del campione).

Parallelamente è stato condotto uno studio per analizzare la *propagazione dell'errore strumentale* nelle misure di flusso di CO<sub>2</sub>, effettuate con l'apparato strumentale in esame.

---

Grande rilevanza, nel presente lavoro, è stata data alla scelta delle tecniche di *elaborazione dei dati ambientali* necessarie ai fini di stimare le emissioni di biogas, partendo da un set di dati misurato in campo su una maglia regolare quadrata.

Rispetto all'elaborazione dei dati sono stati prodotti in ambiente *Matlab* i codici utilizzati per effettuare le analisi quali: la definizione della *distribuzione di probabilità ottimale*; *l'Analisi di Sinclair* per l'individuazione delle sottopopolazioni (ed eliminazione degli *outlier*); la definizione dei parametri statistici delle popolazioni tramite gli *estimatori di Sichel* (e la conseguente *stima del flusso di CO<sub>2</sub>* e dei rispettivi intervalli di confidenza al 95%).

Come ultimo passo ai fini di stimare le emissioni diffuse di biogas si vedrà come è stato definito il *rapporto volumetrico CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>*, misurato sia nei pozzi di captazione che fuori l'area di discarica, nei dispositivi “spia” denominati *Gas-Spy* (CAPITOLO 2).

Dopo una sintetica presentazione delle caratteristiche realizzativo-gestionali delle discariche analizzate (CAPITOLO 3) saranno riportate le risultanze delle campagne di misura effettuate *in situ*.

Delle specifiche campagne di monitoraggio in sito, sono state condotte con il fine di studiare la variazione spaziale del flusso di biogas emesso dalla copertura delle discariche e la variazione temporale in differenti periodi.

Si vedrà come queste analisi permetteranno di *determinare il passo ottimale* della griglia di campionamento da adottare in campo, tramite lo studio del cosiddetto *fattore di copertura* e *definire i rapporti di emissione* fra flussi estivi e invernali connessi alle eventuali dipendenze delle emissioni dalle condizioni meteo-climatiche (CAPITOLO 4).

In conclusione, in seguito alla rielaborazione delle misure fatte in campo, per le 5 discariche esaminate, sono state elaborate le *mappe di isoflusso*, i quantitativi volumetrici dei gas climalteranti dispersi per unità di superficie nel tempo, è stata risolta *l'equazione del bilancio di massa del biogas*, validati i modelli di produzione di biogas che simulano i processi di decomposizione della sostanza organica, e identificato *i coefficienti di emissioni per tipologia di coperture* in opera (CAPITOLO 5).

Obiettivo ultimo di questo studio è risultato quello di ottenere una procedura di monitoraggio e controllo in grado di fornire elementi informativi atti a limitare gli impatti ambientali sul comparto aria e *massimizzare le eventuali opportunità di recupero energetico* da fonti rinnovabili, quale il gas di discarica.



## RINGRAZIAMENTI

---

Un ringraziamento particolare ai miei relatori, Prof. Ing. Ennio Carnevale e Prof. Ing. Andrea Corti. Desidero ringraziare il Prof. Carnevale per l'opportunità offertami in questi anni di lavorare nel suo gruppo di ricerca. Ringrazio il Prof. Corti per avermi supportato, non solo professionalmente, ma soprattutto nella crescita personale ed essere stato, nel continuo dialogo di questi anni, motivo di numerosi stimoli e input. Grazie soprattutto per la quantità di tempo dedicatomi e per la pazienza dimostrata nel “convincermi” ad accettare la realtà!

Desidero ringraziare per il supporto e i buoni consigli l'Ing. Lidia Lombardi, guida nella mia crescita professionale da più di cinque anni, sempre disponibile e presente.

Un particolarissimo ringraziamento ai colleghi, Ing. Matteo Carpentieri e Ing. Paolo Giambini, per essere sempre stati disponibili e pazienti a risolvere i miei dubbi e a rispondere alle mie domande.

Un grazie affettuoso e pieno di riconoscenza ai colleghi Ing. Lorenzo Burberi e Ing. Giacomo Cenni, che sono sempre stati pronti ad accompagnarmi in campo e aiutarmi per i campionamenti. Grazie per la pazienza e per la sincerità sempre dimostrata in questi anni.

Ringrazio per la gentile collaborazione l'Ing. Luca Innocenti e l'Ing. Lorenzo Toni, che si sono resi disponibili ad effettuare le riprese termografiche in impianto.

Un doveroso ringraziamento ai Gestori, ai Direttori tecnici, ai Capocantieri e a tutti gli Operatori degli impianti dove ho svolto l'attività di ricerca, sempre disponibili a suggerirmi, in base alla loro esperienza professionale e personale, soluzioni pratiche e fattibili.

Desidero inoltre ringraziare gli studenti che hanno scelto di svolgere il proprio lavoro di tesi nell'ambito di questa ricerca, per essersi dimostrati coinvolti e interessati e per aver redatto dei lavori di tesi sempre molto apprezzati, in particolare ringrazio gli Ingg.: Graziella Mulas, Elena Bonechi, David Giannini, Diletta Brandaglia e Francesca Giaccherini.

Sono molte ancora le persone che hanno dato un *contributo significativo* allo svolgimento del presente lavoro di tesi, molte le persone che mi hanno aiutato in campo, a loro va tutta la mia riconoscenza.

Un ultimo ringraziamento, ma non meno importante, alla mia famiglia, ai miei amici, a coloro che nel quotidiano, da vicino o da lontano, mi donano il loro affetto e sono fulcro dell'amore e della gioia nella mia vita.

---

## PUBBLICAZIONI DELL'AUTORE DURANTE IL PERIODO DI RICERCA DELLA TESI

---

CORTI A., LOMBARDI L., CENNI G., PECORINI I., BURBERI L., (2009). Experimental estimation of the residual landfill gas production from aerobically biostabilised organic fraction of municipal solid waste. Sardinia 2009 Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5 - 9 October 2009. Cisa Editore. (ISBN 978-88-903557-0-7)

CORTI A., LOMBARDI L., PECORINI I., (2009). Reference procedure definition for accumulation chamber measurements of landfill cover emissions through field experimental campaigns. Sardinia 2009 Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5 - 9 October 2009. Cisa Editore. (ISBN 978-88-903557-0-7)

CORTI A., LOMBARDI L., PECORINI I., (2009). Management conditions and diffused gas emission monitoring correlation in four non-hazardous waste landfills. Sardinia 2009 Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5 - 9 October 2009. Cisa Editore. (ISBN 978-88-903557-0-7)

CORTI A., LOMBARDI L., PECORINI I., (2009). Riferimenti sulla procedura di misura con il metodo della camera di accumulo delle emissioni di gas da discarica attraverso campagne di misura sperimentali in situ. Sardinia 2009 Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5 - 9 October 2009. Cisa Editore. (ISBN 978-88-903557-0-7)

CORTI A., LOMBARDI L., PECORINI I., CARPENTIERI M., GIAMBINI P., (2008). Accumulation chamber method and landfill gas diffuse emissions monitoring. In: SIDISA 2008 - International Symposium on Sanitary and Environmental Engineering. Florence, June 24 - 27, 2008. Cisa Editore. (ISBN 978-88-903557-0-7)

CORTI A., LOMBARDI L., PECORINI I. (2008). A measurement method to measure landfill gas (LFG) emission from landfill surface. In: ISWA/WMRAS World Congress 2008. Singapore, November 3-7, 2008

CORTI A., CARPENTIERI M., GIAMBINI P., LOMBARDI L., PECORINI I. (2007) Landfill gas emission monitoring: direct and indirect methodologies In: Velini AA (ed.), Landfill Research Trends, Chapter 1, Nova Science Publishers (ISBN 978-1-60021-776-0).

---

CORTI A., LOMBARDI L., PECORINI I., FRASSINETTI L., (2007). Diffused landfill gas emission monitoring in non-hazardous waste landfills: study cases. In: Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, 1 - 5 Ottobre 2007 - Cisa Editore (ISBN 987-88-6265-003-8).

## INDICE

---

Riassunto .....	I
Ringraziamenti.....	III
Pubblicazioni dell'autore durante il periodo di ricerca della tesi.....	V
Indice .....	VII
Lista delle figure.....	XIII
Lista delle tabelle .....	XXI
Nomenclatura.....	XXVII
Premessa.....	1
1   Capitolo I: il Biogas da discarica e i metodi per la misura di flussi di gas attraverso superfici porose.....	3
1.1   Introduzione .....	3
1.2   Contesto normativo.....	3
1.2.1   Landfill directive .....	4
1.2.2   D.Lgs 36/2003 .....	6
1.2.3   Linee guida al monitoraggio .....	8
1.3   Processi di degradazione in discarica.....	10
1.3.1   Produzione di biogas in discarica .....	10
1.3.2   Influenza delle condizioni climatiche sulle emissioni di biogas .....	21
1.3.3   Attenuazione naturale del flusso di biogas nella copertura superficiale delle discariche .....	24
1.3.4   Recupero energetico da rifiuti.....	26
1.4   Fenomeni fisici di trasporto dei gas nei mezzi naturali porosi.....	27
1.4.1   Diffusione .....	29
1.4.2   Advezione .....	30

1.4.3	Meccanismo complessivo di trasporto di un gas nel suolo .....	30
1.5	Metodi di misura per le emissioni di gas di scarica .....	31
1.5.1	Metodi diretti. ....	31
1.5.2	Metodi indiretti.....	36
1.5.3	Discussione: esigenze attuali e prospettive future sui metodi delle misure delle emissioni gassose. ....	50
2	Capitolo II: Camera di accumulo statica – Metodi e Materiali.....	51
2.1	Introduzione.....	51
2.1.1	Modello concettuale del monitoraggio proposto nel presente lavoro di tesi .....	51
2.2	Origini e sviluppo del metodo della camera di accumulo.....	53
2.3	Descrizione dell'apparato di misura usato .....	58
2.4	Fondamenti teorici del metodo.....	62
2.5	Studio e individuazione delle condizioni operativo-procedurali ottimali .....	67
2.5.1	Test di laboratorio.....	67
2.5.2	Confronto dei risultati ottenuti con i tre volumi.....	72
2.5.3	Studio per la valutazione del tempo di campionamento ottimale .....	73
2.5.4	Individuazione delle migliori condizioni operative della camera di accumulo in situ	75
2.6	Procedura operativa in campo .....	77
2.6.1	Criterio iniziale di individuazione dei punti di campionamento .....	78
2.7	Studio sulla propagazione degli errori strumentali nel metodo della camera di accumulo.....	79
2.7.1	Propagazione dell'errore strumentale nella derivata al fine di stimare il flusso emesso	79
2.7.2	Propagazione degli errori nella media dei flussi rilevati .....	86
2.7.3	Studio dell'errore generato nella determinazione del coefficiente moltiplicativo K della derivata in funzione delle assunzioni derivanti dal grado di conoscenza delle condizioni ambientali.....	87
2.8	Studio delle tecniche di analisi dei dati ambientali .....	88
2.8.1	Introduzione.....	88

2.8.2	Variabili regionalizzate .....	89
2.8.3	Analisi di Sinclair .....	94
2.8.4	Stima del flusso totale di CO <sub>2</sub> diffuso dal suolo.....	102
2.8.5	Analisi spaziale delle emissioni di CO <sub>2</sub> . ....	105
2.9	Studio e analisi delle azioni ausiliarie e contestuali necessarie al monitoraggio delle emissioni con camera di accumulo .....	116
2.9.1	Controllo dei parametri al contorno delle campagne con camera di accumulo ..	116
2.9.2	Valutazione del carico emissivo di biogas campionato.....	116
2.9.3	Tecniche per il Monitoraggio di eventuali fughe laterali di biogas da discarica – Dispositivi Gas-Spy.....	120
2.9.4	Bilancio di massa e verifica dei modelli di produzione del biogas. ....	122
2.9.5	Valutazioni in merito alla soglia di attenzione di flussi di CO <sub>2</sub> emessi dai terreni fuori dall'area di discarica .....	124
2.10	Conclusioni .....	126
3	Capitolo III: Casi di studio su scala Regionale.....	129
3.1	Introduzione. ....	129
3.2	Discarica Lf-a.....	130
3.2.1	Evoluzione storica dell'impianto Lf-a. ....	131
3.2.2	Descrizione dell'impianto.....	131
3.2.3	Gestione dell'impianto.....	136
3.2.4	Attività di monitoraggio e di sperimentazione svolte durante il periodo della ricerca nella discarica in esame .....	139
3.2.5	Ubicazione dei campioni interni ed esterni al corpo di discarica.....	140
3.2.6	Breve descrizione delle attività di cantiere durante il periodo di indagine .....	141
3.2.7	Descrizione delle condizioni ambientali e meteo-climatiche .....	142
3.3	Discarica LF-b .....	143
3.3.1	Inquadramento generale dell'impianto .....	143
3.3.2	Gestione dell'impianto.....	145
3.3.3	Attività di monitoraggio e di sperimentazione svolte nella discarica in esame....	148

---

3.3.4	Ubicazione dei campioni interni ed esterni al corpo di discarica .....	149
3.4	Discarica Lf-c .....	150
3.4.1	Inquadramento generale dell'impianto .....	150
3.4.2	Gestione dell'impianto .....	151
3.4.3	Ubicazione dei campioni interni ed esterni al corpo di discarica .....	152
3.5	Discarica Lf-d .....	153
3.5.1	Inquadramento area oggetto di studio .....	153
3.5.2	Descrizione del sito .....	153
3.5.3	Ubicazione dei campioni .....	155
3.6	Discarica Lf-e .....	156
3.6.1	Descrizione sintetica dell'impianto .....	158
3.7	Schema riassuntivo delle principali caratteristiche .....	160
4	Capitolo IV: Risultati dello studio della variazione spaziale e variazione temporale del flusso di biogas da discarica .....	163
4.1	Introduzione .....	163
4.2	Variazione spaziale del flusso .....	163
4.2.1	Obiettivi .....	163
4.2.2	Campagne di misura sperimentali .....	164
4.2.3	Risultati .....	169
4.2.4	Determinazione dell'algoritmo per definire la maglia ottimale .....	183
4.2.5	Maglia sub metrica .....	184
4.2.6	Conclusioni .....	187
4.3	Variazione temporale .....	188
4.3.1	Studio dell'andamento giornaliero .....	188
4.3.2	Studio dell'andamento stagionale .....	195
4.3.3	Algoritmo per il calcolo del fattore di correzione climatico .....	200
4.4	Conclusioni .....	201



5	Capitolo V: Risultati delle Campagne di monitoraggio delle emissioni diffuse di biogas ed elaborazione dei dati ambientali .....	203
5.1	Introduzione .....	203
5.2	Caso Lf-a .....	204
5.2.1	Preprocessazione dei dati .....	204
5.2.2	Risultati delle campagne di monitoraggio estive effettuate dentro l'area di discarica .....	205
5.2.3	Confronto fra le emissioni risultati e i VLE proposti come modifica alla Landfill Directive .....	227
5.2.4	Risultati della campagna di monitoraggio estive e invernali effettuate fuori l'area di discarica .....	228
5.2.5	Variogramma e carta di isoflusso .....	231
5.2.6	Individuazione delle fughe laterali di biogas – Risultati del monitoraggio sui Gas-Spy	237
5.2.7	Bilancio di massa e verifica dei modelli di produzione del biogas .....	240
5.2.8	Azioni di ottimizzazione della captazione del biogas – Post-processing progettuale e feedback gestionale.....	243
5.2.9	Caratterizzazione di differenti tipi di coperture in termini di emissioni .....	246
5.2.10	Confronto qualitativo fra i parametri al contorno e i flussi misurati: temperatura ambientale, temperature del terreno e presenza vegetazione.....	251
5.2.11	Studio del flusso in funzione della temperatura .....	253
5.3	Caso Lf-b.....	254
5.3.1	Risultati della campagna di monitoraggio dentro l'area di discarica.....	254
5.3.2	Confronto fra le emissioni risultati e i VLE proposti come modifica alla Landfill Directive .....	256
5.4	Risultati della campagna di monitoraggio estive e invernali effettuate fuori l'area di discarica.....	257
5.4.2	Valutazione del coefficiente di captazione e delle prestazioni del modello previsionale del biogas –feedback gestionale .....	260
5.4.3	Interventi intesi a ridurre e abbattere la probabilità di accadimento di fughe di biogas	261
5.5	Caso Lf-c .....	263

---

5.5.1	Risultati delle campagne di monitoraggio.....	263
5.5.2	Valutazione del coefficiente di captazione e delle prestazioni del modello previsionale di produzione del biogas.....	265
5.5.3	Interventi intesi a ridurre e abbattere la probabilità di accadimento di fughe di biogas: 267	
5.6	Caso Lf-d.....	269
5.6.1	Risultati delle campagne di monitoraggio.....	269
5.6.2	Modellazione teorica della produzione di biogas alla ex-discarda di Lf-d.....	273
5.6.3	Valutazione dei costi ambientali per i tre scenari – Emissioni di CO <sub>2</sub> .....	281
5.7	Caso Lf-e.....	286
5.7.1	Risultati della campagna di monitoraggio con camera di accumulo .....	286
5.7.2	Valutazione delle prestazioni del modello previsionale di produzione del biogas 290	
5.7.3	Elaborazioni delle misure effettuate fuori l'area di discarda.....	291
5.7.4	Elaborazione della distribuzione areale dei flussi superficiali interni ed esterni alla discarda .....	292
5.8	Conclusioni.....	294
6	Conclusioni .....	298
	Bibliografia.....	308
	Appendice A: Protocollo di misura.....	318
	Appendice B: Termografia terrestre.....	326
	Appendice C: Sistema di rilevamento satellitare della posizione (GPS). ....	334

## LISTA DELLE FIGURE

Figura 1.1: Schema generalizzato dei processi di biodegradazione che avvengono in discarica (Bogner J. E., et al. 1996).	13
Figura 1.2: Evoluzione tipica della composizione del biogas nel tempo.	13
Figura 1.3: Confronto tra i valori del tasso di migrazione del metano, della pressione barometrica e del gradiente della pressione barometrica (Staka F., 1997, modificata)	22
Figura 1.4: Dipendenza del contenuto di CH <sub>4</sub> nel gas interstiziale di copertura con la pressione ambientale (Gebert et al., 2006).	25
Figura 1.5: Variazione stagionali delle concentrazioni di CH <sub>4</sub> in copertura, a sinistra gli andamenti a differenti profondità a destra le concentrazioni negli <i>hot spot</i> .	25
Figura 1.6: Risultanze dello studio degli autori Rachor, Streese-Kleeberg and Gebert (2009)	26
Figura 1.7: Rappresentazione schematica dei processi di recupero di energia (de Fraja Frangipane et al. 1995)	28
Figura 1.8 (a: Schema del sistema per la misura del flusso di CO <sub>2</sub> . I principali componenti sono uno spettro-fotometro ad IR, una pompa a flusso costante ed una speciale sonda di misura. (b: Schema della sonda usata per la misura della permeabilità <i>in situ</i> ).	33
Figura 1.9: Camera di accumulo: a) modalità statica, b) modalità dinamica.	35
Figura 1.10: Rappresentazione grafica del metodo tracciante. (Czepiel P. M., et al., 2003)	37
Figura 1.11: Antenne dotate di anemometro ultrasonico e analizzatore di gas usate con la tecnica dell' <i>"eddy-correlation"</i> . Queste antenne vengono sistemate sulle torri di misura alte qualche metro...	42
Figura 1.12: Schema del sistema di misura; la massa d'aria sotto indagine è quella compresa tra il laser e il retroriflettore.	49
Figura 2.1: Modello concettuale del monitoraggio	53
Figura 2.2: Prototipo della camera di accumulo sulla base del progetto originario del Dr. John Norman (University of Wisconsin).	54
Figura 2.3: Schema generale della strumentazione necessaria per la metodologia della camera di accumulo.	56
Figura 2.4: Vista della camera di accumulo con i suoi componenti.	60
Figura 2.5: V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , V <sub>3</sub> – Volumi di controllo	60
Figura 2.6: Analizzatore ad infrarossi: pannello frontale.	61
Figura 2.7: Strumentazione assemblata – Test <i>in situ</i> .	62

Figura 2.8: Schematizzazione dei flussi di ingresso e di uscita dalla camera di accumulo.....	62
Figura 2.9: Esempio di Abaco per il calcolo di K per il V3. ....	66
Figura 2.10: Test di laboratorio (a) - Due differenti volumi di controllo (b).....	67
Figura 2.11: Banco Prova (a) – Bombola e riduttore di pressione (b).....	68
Figura 2.12: Pendenze relative al flusso di 30 ml/min di CO <sub>2</sub> .....	70
Figura 2.13: Media delle 5 misure di pendenza per i flussi di CO <sub>2</sub> rilevati con V1, V2 e V3 (la derivata è misurata in termini di <i>ppm CO<sub>2</sub>/sec</i> ). ....	73
Figura 2.14: Rappresentazione ideale dell'andamento della concentrazione di CO <sub>2</sub> nel tempo e le relative aree di interesse.....	76
Figura 2.15: Prove comparative delle misure della camera di accumulo condotte in tre diverse modalità (a sinistra – b destra).....	76
Figura 2.16: Modello concettuale ai fini di studiare l'errore strumentale .....	79
Figura 2.17: Errore assoluto strumentale calcolato per una campagna di misura estiva.....	82
Figura 2.18: Errore relativo strumentale calcolato per una campagna di misura estiva .....	82
Figura 2.19: Errore assoluto strumentale calcolato per una campagna di misura invernale .....	83
Figura 2.20: Errore relativo strumentale calcolato per una campagna di misura invernale.....	83
Figura 2.21: Errore assoluto tipo.....	84
Figura 2.22: Errore relativo tipo.....	85
Figura 2.23: Confronto degli errori strumentali per due differenti campagne (estiva e invernale) .....	86
Figura 2.24: Box Plot .....	91
Figura 2.25: Schema a blocchi della procedura di Sinclair. ....	94
Figura 2.26: Segnalazione dei punti di flesso su un'ipotetica distribuzione. ....	97
Figura 2.27: Parziali sovrapposizioni tra popolazioni. ....	98
Figura 2.28: Rette modellanti che approssimano le popolazioni. ....	99
Figura 2.29: Posizionamento dei punti di controllo rappresentati da triangoli.....	101
Figura 2.30: Rappresentazione del modello di validazione. ....	102
Figura 2.31: Estimatori di Sichel .....	104
Figura 2.32: Descrizione empirica della variabilità spaziale: covarianza delle coppie. ....	106
Figura 2.33: Correlazione della coppia in funzione della distanza. ....	107
Figura 2.34: Descrizione empirica della variabilità spaziale: dispersione degli incrementi.....	108
Figura 2.35: Dispersione degli incrementi in funzione della distanza.....	108

Figura 2.36: Andamento dei modelli elementari e loro possibili combinazioni. ....	110
Figura 2.37: Esempio di modellazione. ....	111
Figura 2.38: Distribuzione dell'errore di stima. ....	113
Figura 2.39: Sottostazione di biogas, dove sono state effettuate le misure. ....	120
Figura 2.40: Sezione del "gas-spy" inserito nel terreno. ....	121
Figura 2.41: Caratteristiche salienti del tubo di campionamento. ....	121
Figura 2.42: Operazioni di scavo per la realizzazione dei "Linear Gas-spy". ....	122
Figura 2.43: Volume di controllo considerato per il bilancio di massa. ....	122
Figura 3.1: Schema planimetrico di riferimento (in grigio scuro la zona occupata dal sito) .....	130
Figura 3.2: Impianto di produzione di energia e torcia per la distruzione del biogas non sfruttato dal motore.....	135
Figura 3.3: Conferimenti annui e codici CER .....	137
Figura 3.4: Produzione annuale di percolato della discarica Lf-a.....	138
Figura 3.5: Produzione di biogas estratto dalla piattaforma di trattamento .....	138
Figura 3.6: Identificazione e ubicazione dei punti campionati, durante il mese di settembre 2007. ....	140
Figura 3.7: Schema planimetrico di riferimento (evidenziata la zona occupata dal sito) .....	143
Figura 3.8: Conferimenti annui. ....	146
Figura 3.9: Produzione annuale di percolato. ....	147
Figura 3.10: Percolato smaltito mensilmente nel 2008. ....	147
Figura 3.11: Dati sul biogas captato e energia prodotta.....	148
Figura 3.12: Identificazione e ubicazione dei punti campionati. ....	149
Figura 3.13: Planimetre discarica Lf-c e ubicazione campioni.....	152
Figura 3.14: Schema del sistema di captazione Lf-d.....	154
Figura 3.15: Identificazione e ubicazione dei punti campionati (in figura sono indicati anche i campioni aggiuntivi "g" monitorati durante la campagna estiva). ....	156
Figura 3.16: Identificazione e ubicazione dei punti campionati.....	159
Figura 4.1: Inquadramento delle aree di indagine.....	164
Figura 4.2: Ubicazione dei punti di campionamento. ....	166
Figura 4.3: Rappresentazione grafica dei valori misurati in riferimento alla posizione (gli intervalli da legenda corrispondono ai quantili: 99%, 95%, 50%, 5%, 1%). ....	166
Figura 4.4: Maglia di prova 20x20 m, con passo 2.5 m.....	167

Figura 4.5: Analisi termografica del QCI; identificazione dei “punti caldi” .	168
Figura 4.6: Rappresentazione grafica dei valori misurati in riferimento alla posizione, QCI (gli intervalli da legenda corrispondono ai quantili: 99%, 95%, 50%, 5%, 1%).	168
Figura 4.7; Rappresentazione grafica dei valori misurati in riferimento alla posizione, QCE (gli intervalli da legenda corrispondono ai quantili: 99%, 95%, 50%, 5%, 1%).	169
Figura 4.8: Funzioni di distribuzione di probabilità delle singole popolazioni, nel piano normalizzato.	172
(eseguite) Figura 4.9: Istogrammi delle popolazioni corrispondenti alle maglie 35x35 (a), 50x50 (b), 70x70 (c) e 100x100 (d)	172
Figura 4.10: Andamento del flusso medio in funzione dei fattori di copertura	174
Figura 4.11: Istogrammi del flusso e del suo logaritmo, distribuzione log-normale multi-modale (popolazione relativa alla maglia 2.5x2.5 m, 81 campioni)	175
Figura 4.12: Funzioni di distribuzione di probabilità delle singole popolazioni, nel piano normalizzato	175
Figura 4.13: Istogramma della popolazione 2.5X2.5 e funzione di distribuzione di probabilità delle singole popolazioni, nel piano normalizzato, QCE	177
Figura 4.14: Andamento del flusso medio in funzione dei fattori di copertura, caso QCI	177
Figura 4.15: Andamento del flusso medio in funzione dei fattori di copertura, caso QCE.	178
Figura 4.16: Maglia di campionamento indagata nell’area di indagine interna al buffer distante 50 m dal cordolo di ancoraggio.	179
Figura 4.17: Confronto fra i valori medi di flusso ottenuti con le maglie complementari, BP	181
Figura 4.18: Confronto fra i valori medi di flusso ottenuti con le maglie complementari, QCI	182
Figura 4.19: Confronto fra i valori medi di flusso ottenuti con le maglie complementari, QCE.	183
Figura 4.20: Schema del reticolo, in blu sono raffigurati i punti in cui si è disposta la camera, i dati sono in cm.	184
Figura 4.21: Foto del reticolo, con l’individuazione della postazione B.	185
Figura 4.22: Mappatura del flusso rilevato nella maglia.	185
Figura 4.23: Flusso medio nei punti riferito al fattore di copertura degli stessi.	186
Figura 4.24: Flusso medio nei punti riferito al fattore di copertura degli stessi.	187
Figura 4.25: Andamento gioraliero di un flusso medio elevato in confronto alla velocità media del vento	189
Figura 4.26: Relazioni tra la variazione giornaliera del flusso e dei dati climatici.	190
Figura 4.27: Andamento gioraliero del 16 ottobre 2008	191
Figura 4.28: Andamento dei dati gioralieri del 17 luglio 2009	193
Figura 4.29: Misure rilevate il giorno 15 ottobre - Camere V1 e V3	194

Figura 4.30: Vecchi moduli Lf-a.....	195
Figura 4.31: Andamento stagionale dei flussi rilevato nei vecchi moduli.....	196
Figura 4.32: Andamento stagionale dei dati nei punti A, B, C - V1, V2, V3.....	197
Figura 4.33: Andamento stagionale dei dati medi giornalieri nel modulo dei punti A, B, C rilevato con i tre volumi - (indicazione del primo valore misurato all 8 del mattino).....	197
Figura 4.34: Relazioni fra il flusso e la temperatura (a), la pressione (b) e l'umidità(c). ....	198
Figura 5.1: Immagine tratta dal programma in codice Matlab. ....	205
Figura 5.2: Istogramma dei dati sperimentali e del logaritmo naturale dei dati sperimentali.....	208
Figura 5.3: Cartogramma dei 106 dati campionamenti interni al corpo di discarica- 2007 .....	210
Figura 5.4: Cartogramma dei 86 dati campionamenti internamente al corpo di discarica 2008.....	210
Figura 5.5: Cartogramma dei 53 dati campionamenti interni al corpo di discarica-2009 .....	211
Figura 5.6: Cumulata dei flussi di CO <sub>2</sub> relativa alla campagna di misure eseguita nel 2006.....	212
Figura 5.7: Indicazione del posizionamento delle inflessioni e dei nomi delle popolazioni .....	212
Figura 5.8: Determinazione delle rette di modello delle popolazioni.....	213
Figura 5.9: Analisi di Sinclair a due popolazioni. ....	214
Figura 5.10: Analisi di Sinclair a tre popolazioni – caso 1.....	215
Figura 5.11: Analisi di Sinclair a tre popolazioni – caso 2. ....	216
Figura 5.12: Analisi di Sinclair a quattro popolazioni: flesso centrale posizionato al valore 55,09% di probabilità cumulata.....	217
Figura 5.13: Analisi di Sinclair a quattro popolazioni: flesso centrale posizionato al valore 58,48% di probabilità cumulata.....	217
Figura 5.14: Elaborazione delle misure.....	220
Figura 5.15: Distribuzione di probabilità statistica dei flussi e analisi di Sinclair con validazione – Caso 2009.....	221
Figura 5.16: Box Plot - caso Lf-a 2009 .....	222
Figura 5.17: Risultati delle misure nei pozzi di captazione .....	225
Figura 5.18: Grafico binario CO <sub>2</sub> % vs. CH <sub>4</sub> - caso Lf-a 2006 .....	225
Figura 5.19: Istogramma della popolazione relativa alla maglia ufficiale + aggiuntiva.....	230
Figura 5.20 Analisi esplorativa spaziale dei dati campionamenti esternamente al corpo di discarica – Giugno 2009. ....	231
Figura 5.21: Variogramma sperimentale omnidirezionale delle misure del flusso di CO <sub>2</sub> e relativo modello matematico - caso Lf- a 2006.....	232

Figura 5.22: Mappa di isoflusso per la CO <sub>2</sub> elaborata per il 2006 con il Software Surfer.....	233
Figura 5.23: Rappresentazione tridimensionale delle emissioni di CO <sub>2</sub> elaborata per il 2006 con il Software Surfer.....	233
Figura 5.24: Emissioni di CO <sub>2</sub> e tipi di copertura nella discarica Lf- a - 2006.....	234
Figura 5.25: Area in coltivazione. ....	234
Figura 5.26: Particolare del telo in LDPE: i fori sono dovuti alla avi-fauna. ....	235
Figura 5.27: Spaccature del terreno: punti di criticità.....	236
Figura 5.28: Emissioni di CO <sub>2</sub> e tipi di copertura nella discarica Lf- a - 2007.....	236
Figura 5.29: Emissioni di CO <sub>2</sub> e tipi di copertura nella discarica Lf-a - 2008. ....	237
Figura 5.30: Emissioni di CO <sub>2</sub> e tipi di copertura nella discarica Lf-a - 2009. ....	237
Figura 5.31: Media delle concentrazioni di CH <sub>4</sub> , CH <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> misurata nei Gas-spy e confronto con la composizione naturale del gas interstiziale .....	239
Figura 5.32: Variabilità stagionale della temperatura e del flusso di biogas.....	239
Figura 5.33: Variabilità stagionale della temperatura, e valori medi di CH <sub>4</sub> nei Gas-Spy .....	239
Figura 5.34: Rappresentazione grafica degli output dei modelli di produzione di biogas.....	241
Figura 5.35: Out-put del modello Scholl- Canyon .....	241
Figura 5.36: a) Messa in opera nell'inverno 2005 del dreno perimetrale; b) teste di captazione dedicate all'aspirazione del dreno, aggiunte a dicembre 2006. ....	244
Figura 5.37: Copertura per le discariche ai sensi del D. Lgs 36/2003.....	247
Figura 5.38: Tipi di copertura e punti di campionamento. ....	248
Figura 5.39: Planimetria della discarica con indicazione dei tipi di copertura - 2007. ....	250
Figura 5.40: Carta di isoflusso con indicazione dei tipi di copertura messi in opera - 2007.....	250
Figura 5.41: Andamento della Temperatura del terreno in discarica (anno 2009) e analisi della presenza/assenza della vegetazione erbacea.....	252
Figura 5.42: Relazione fra flussi medi (interni e esterni alla discarica) e la temperatura .....	253
Figura 5.43: Grafico binario CO <sub>2</sub> % vs. CH <sub>4</sub> . anno 2006.....	255
Figura 5.44: Rappresentazione dei pozzi con rapporto molare CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> <0,9 e con CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> >1,1. ....	255
Figura 5.45: Studio dei flussi interni ed esterni in funzione della temperatura.....	257
Figura 5.46: Carte di isoflusso relative agli anni 2006 - 2008.....	258
Figura 5.47: Carta di isoflusso 2009 .....	259
Figura 5.48: Rappresentazione grafica degli output dei modelli di produzioni annue di biogas. ....	260



Figura 5.49: Trincea drenante, schema qualitativo .....	261
Figura 5.50: Ubicazione degli interventi.....	262
Figura 5.51: Dreno sub-orizzontale in aspirazione, schema qualitativo .....	262
Figura 5.52: Risultanze dei monitoraggi.....	263
Figura 5.53: Decadimento delle emissioni di biogas sul modulo esaurito .....	263
Figura 5.54: Carta di isoflusso .....	265
Figura 5.55: Rappresentazione grafica degli output dei modelli di produzioni annue di biogas. ....	266
Figura 5.56: Schema rappresentativo, non in scala. ....	268
Figura 5.57: Carta di isoflusso, a sinistra novembre 2008 - a destra Luglio 09 (legenda del novembre 2008) .....	272
Figura 5.58: Analisi merceologica del rifiuto (anno 1997- Piano Prov. Gest. RU). ....	273
Figura 5.59: Rappresentazione grafica degli output di modello di produzioni annue di biogas. ....	274
Figura 5.60: Legenda Layout rete di captazione.....	276
Figura 5.61: Layout di impianto di captazione e trattamento del biogas secondo lo stato dell'arte.....	277
Figura 5.62: Curve di produzione utilizzate per valutare l'energia elettrica potenzialmente producibile .....	280
Figura 5.63: Emissioni di CO <sub>2</sub> dei differenti scenari.....	283
Figura 5.64: Cartogramma dei 115 dati campionamenti internamente al corpo di discarica. ....	287
Figura 5.65: Schema riassuntivo .....	289
Figura 5.66: Rappresentazione grafica degli output di modello di produzioni teoriche orarie di biogas. ....	290
Figura 5.67 Analisi esplorativa spaziale dei dati campionamenti esternamente al corpo di discarica. ....	291
Figura 5.68: Carta di isoflusso .....	292
Figura 5.69: Vista 3D della carta di isoflusso.....	293
Figura 5.70: Indicazione della presenza di vegetazione nei punti di indagine.....	294
Figura 5.71: Temperatura del suolo indagato (profondità, 10 cm dal p.c.).....	294
Figura b.1: Viste delle superfici indagate. ....	327
Figura b.2: Vista 1.....	328
Figura b.3: Analisi termografica del QCI; identificazione dei "punti caldi". VISTA 1. ....	328
Figura b.4: Rappresentazione grafica dei valori misurati in riferimento alla posizione, QCI (gli intervalli da legenda corrispondono ai quantili: 99%, 95%, 50%, 5%, 1%). ....	329

---

Figura b.5: Scarpata moduli di ampliamento, VISTA 2.....	329
Figura b.6: Scarpata vecchi moduli, VISTA 3. ....	330
Figura b.7: VISTA 4.....	330
Figura b.8: VISTA 5.....	331
Figura b.9: VISTA 6.....	331

## LISTA DELLE TABELLE

---

Tabella 1.1: Proposte di modifica alla Landfill Directive da parte della <i>Sustainable Landfill Foundation</i> (2009).....	5
Tabella 1.2: Fattori che influenzano la produzione di biogas. ....	16
Tabella 1.3: Costituenti principali del biogas (i valori tra parentesi sono da considerarsi anomali) (Damiani A. et al.,1992) .....	19
Tabella 1.4: Proprietà delle componenti principali del biogas da discarica (Damiani A. et al.,1992). ....	20
Tabella 2.1: Informazioni relative alle misure geometriche della camera di accumulo e analizzatori di gas tratte dalla letteratura. ....	58
Tabella 2.2: Dimensioni Camere di Accumulo.....	60
Tabella 2.3: Dimensioni dei Tubi di collegamento. ....	61
Tabella 2.4: Dati relativi al flusso 20 ml/min. ....	69
Tabella 2.5: Dati relativi al flusso 30 ml/min;.....	69
Tabella 2.6: Dati relativi al flusso 40 ml/min. ....	69
Tabella 2.7: Dati relativi al flusso 20 ml/min. ....	70
Tabella 2.8: Dati relativi al flusso 30 ml/min;.....	70
Tabella 2.9: Dati relativi al flusso 40 ml/min;.....	70
Tabella 2.10: Dati relativi al flusso 100 ml/min. ....	71
Tabella 2.11: Prova senza ricircolo con V1. ....	71
Tabella 2.12: Stima delle'errore dovuto all'introduzione della scatola. ....	72
Tabella 2.13: : Stima dei record necessari per il volume 3. ....	74
Tabella 2.14: Numero dei record necessari per i tre volumi ....	75
Tabella 2.15: Esemplificazione del calcolo dell'errore strumentale .....	81
Tabella 2.16: Valori di derivate tipo per diversi intervalli di campionamento .....	85
Tabella 2.17: Propagazione dell'errore strumentale nella media .....	87
Tabella 2.18: Studio dell'errore introdotto dal coeff. K .....	88
Tabella 2.19: Equazioni dei modelli elementari di variogramma (Bruno et al.,1994) .....	110
Tabella 2.20 Informazioni ottenute tramite misura con sonda superficiale .....	117

Tabella 2.21: Valori di flusso, media giornaliera, (considerato solo l'80% del campione) .....	124
Tabella 2.22: Valori misurati di flusso di CO <sub>2</sub> ottenuti con camera di accumulo dinamica.....	124
Tabella 2.23: Valori misurati di flusso di CO <sub>2</sub> ottenuti con camera di accumulo dinamica.....	124
Tabella 2.24: Flussi caratteristici di CO <sub>2</sub> e i relativi errori .....	126
Tabella 3.1: Scansione temporale delle campagne speditive condotte c/o l'impianto Lf-a. ....	139
Tabella 3.2: Dati rilevati dalla stazione metereologica durante i giorni di misura. Valori medi. ....	142
Tabella 3.3: Condizioni Meteo-Climatiche.....	148
Tabella 3.4: Produzione di Percolato.....	151
Tabella 3.5: Scansione temporale delle campagne speditive condotte c/o l'impianto di Lf-e. ....	157
Tabella 3.6: Informazioni raccolte durante i sopralluoghi .....	158
Tabella 4.1: Parametri statistici ed errori.....	171
Tabella 4.2: Errori relativi in relazione al valore medio stimato per la maglia con passo 25 m.....	174
Tabella 4.3: Parametri statistici QCI .....	176
Tabella 4.4: Parametri Statistici del QCE.....	177
Tabella 4.5: Parametri statistici - anno di riferimento 2007.....	180
Tabella 4.6: Parametri statistici - anno di riferimento 2008 .....	180
Tabella 4.7: Parametri statistici delle maglie complementari, QCI .....	181
Tabella 4.8: Parametri statistici delle maglie complementari, QCE.....	182
Tabella 4.9: Andamento del flusso nel reticolo.....	186
Tabella 4.10: Andamento del flusso nel reticolo con i fattori di copertura.....	186
Tabella 4.11: Flussi misurati il giorno 26 maggio 2008 e valori rilevati dalla stazione meteo .....	189
Tabella 4.12: Andamento stagionale dei dati nel modulo dei punti A, B, C.....	199
Tabella 4.14: Andamento stagionale dei dati nel modulo vecchi. ....	200
Tabella 4.15: Fattore di correzione estate-inverno .....	200
Tabella 5.1: Risultati dei campionamenti effettuati sulla maglia 50x50 m – Giugno 2009 .....	206
Tabella 5.2: Limit detection.....	206
Tabella 5.3: Variazione coeff. K.....	207
Tabella 5.4: Frequenze riferite ai dati di flusso di CO <sub>2</sub> misurati nella discarica Rota. Le categorie hanno intervalli espressi in mol*m <sup>-2</sup> *d <sup>-1</sup> . Agosto 2006.....	208
Tabella 5.5: Parametri statistici dei set di dati relativo agli anni 2006-2009 .....	209

Tabella 5.6: Ascisse dei punti di flesso della curva cumulata.....	212
Tabella 5.7: Ampiezza popolazioni in valore percentuale rispetto al totale.....	218
Tabella 5.8: Stima dei flussi medi e livelli di confidenza al 95% per le varie popolazioni. ....	218
Tabella 5.9: Emissioni rapportate alla superficie di competenza di ogni singola popolazione. ....	218
Tabella 5.10: Emissione media di CO <sub>2</sub> della discarica Lf-a e intervalli di confidenza al 95%.....	219
Tabella 5.11: Ampiezza popolazioni in valore percentuale rispetto al totale. ....	219
Tabella 5.12: Emissione media di CO <sub>2</sub> della discarica Lf-a e intervalli di confidenza al 95%.....	219
Tabella 5.13: Valori statistici delle popolazioni ottenute con l'analisi di Sinclair. Flussi espressi moli/m <sup>2</sup> giorno.....	221
Tabella 5.14: Sinclair applicato al caso Lf-a 2009 .....	222
(segue) Tabella 5.15: Risultati delle misure effettuati con Sonda Superficiale - Caso Lf-a 2007 .....	223
Tabella 5.16: Quantità massima di biogas emessa dal corpo della discarica Lf-a .....	226
Tabella 5.17: Confronto con i flussi specifici di discariche con impianto di aspirazione. ....	226
Tabella 5.18: Confronto fra i valori di emissione e il VLE proposti dalla <i>Sustainable Landfill Foundation</i> .....	228
Tabella 5.19: Risultati dei campionamenti effettuati sui punti esterni al corpo di discarica e Studio dell'errore strumentale e limit detection - caso Lf-a 2009.....	229
Tabella 5.20: Parametri statistici delle popolazioni del flusso di CO <sub>2</sub> . ....	230
Tabella 5.21: Storico dei coefficienti di captazione, produzioni annue.....	242
Tabella 5.22: Confronto fra gli output di modello e i valori reali.....	242
Tabella 5.23: Caratterizzazione statistica dei dati sperimentali relativi alle diverse coperture. I flussi sono espressi in [mol*m <sup>-2</sup> *d <sup>-1</sup> ]. ....	248
Tabella 5.24: Flussi specifici per ciascun tipo di copertura.....	249
Tabella 5.25: Parametri statistici delle popolazioni suddivise in funzione delle coperture. ....	249
Tabella 5.26: Confronto fra i valori medi di emissione dalle coperture. ....	250
Tabella 5.27: Confronto fra i valori medi di emissione per tipologia di coperture (anni 2006 e 2007) e i flussi emessi dal terreno naturale (media estiva) .....	251
Tabella 5.28: Relazioni fra i flussi medi misurati dal 2006 al 2009 e la temperatura.....	253
Tabella 5.29: Flussi estivi e calcolo del fattore correttivo estate-inverno.....	253
Tabella 5.30: Parametri statistici dei set di dati raccolti dal 2006 al 2009.....	254
Tabella 5.31: Quantità massima di biogas emessa dal corpo della discarica Lf-b .....	256

Tabella 5.32: Confronto con i flussi specifici di discariche con impianto di aspirazione.....	256
Tabella 5.33: Confronto fra i valori di emissione e il VLE proposti dalla <i>Sustainable Landfill Foundation</i> .....	257
Tabella 5.34: Parametri statistici delle popolazioni del flusso di CO <sub>2</sub> . Flussi espressi in Moli/mq giorno .....	258
Tabella 5.35 Stime secondo i modelli utilizzati di biogas prodotto.....	260
Tabella 5.36: Coefficiente di captazione per l'anno 2007, valori medi orari .....	260
Tabella 5.37: Quantità massima di biogas emessa dal corpo della discarica Lf-a e quindi non captata dall'impianto. ....	264
Tabella 5.38: Confronto con i flussi specifici di discariche con impianto di aspirazione. ....	264
Tabella 5.38: Confronto fra i modelli e errore relativo rispetto al valore di biogas emesso dalla copertura. ....	266
Tabella 5.39: Confronto fra i modelli .....	266
Tabella 5.41: Rapporto CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> sul biogas profondo .....	269
Tabella 5.42: Parametri statistici.....	270
Tabella 5.43: Valori di flusso stimati.....	270
Tabella 5.44: Confronto con i flussi specifici di discariche senza impianto di aspirazione. ....	271
Tabella 5.45: Conferimenti – Fonte Progetto “Impianto Raccolta e smaltimento biogas” .....	273
Tabella 5.46: Definizione scenari .....	275
Tabella 5.47: Stima dei costi scenario 1.....	277
Tabella 5.48: costi MCI riferiti all'anno 2008 .....	279
Tabella 5.48: costi opzionali per il sistema di depurazione fumi.....	279
Tabella 5.50: Ipotesi di produzione di EE.....	280
Tabella 5.51: Ricavi e costi .....	281
Tabella 5.52: Flusso di cassa medio annuo .....	281
Tabella 5.52: Valori di input utili per risolvere il bilancio di massa della CO <sub>2</sub> .....	282
Tabella 5.53: Tonnellate di CO <sub>2</sub> emesse dal 2010 al 2022.....	282
Tabella 5.55: Analisi degli scenari .....	283
Tabella 5.56: Parametri statistici della popolazione .....	286
Tabella 5.57: Parametri statistici delle popolazioni. Contributi suddivisi per moduli. ....	286
Tabella 5.58: Parametri statistici rappresentativi del chimismo del biogas profondo.....	288

Tabella 5.59: Valori di flusso stimati .....	288
Tabella 5.60: Confronto con i flussi specifici di discariche con impianto di aspirazione. ....	288
Tabella 5.61 Stime secondo i modelli utilizzati di biogas prodotto. ....	290
Tabella 5.62: Parametri statistici delle popolazioni del flusso di CO <sub>2</sub> .....	291

---



## NOMENCLATURA

### SIMBOLI LATINI

<i>Simboli</i>	<i>Descrizione</i>
$A$	l'area coperta dalla camera
$C_c$	la concentrazione di $CO_2$ all'interno della camera di accumulo
$C_d$	la "concentrazione dinamica" della $CO_2$ (espressa in ppm vol)
$C_i$	la concentrazione della specie gassosa considerata ( $M \cdot L^{-3}$ )
$CH_4$	metano
$CO_2$	anidride carbonica
$CO$	monossido di carbonio
$C_aH_bO_cN_dS_e$	Formula bruta della sostanza degradabile dei rifiuti
$G_{PB}$	il gradiente della pressione barometrica [ $dP_B/dt$ ]
$H_2$	idrogeno
$H_2S$	idrogeno solforato
$H_2O$	acqua
$H_A$	la costante di Henry
$H$	l'altezza della camera di accumulo [m]
$J_{d,i}$	il flusso diffusivo della specie gassosa considerata ( $M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$ )
$J_{ad,i}$	flusso advettivo della specie gassosa considerata ( $M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$ )
$k$	la permeabilità intrinseca del suolo ossia la capacità del suolo di essere attraversato da un fluido ( $L^2$ )
$M$	una costante empirica che dipende dalla geometria del sistema di campionamento utilizzato, dal flusso della pompa dello strumento, dalla profondità di inserimento della sonda nel suolo e dalla permeabilità del suolo- <i>metodo dinamico</i>
$N_2$	azoto
$NH_3$	ammoniaca
$O_2$	ossigeno
$P$	la pressione barometrica [mbar];
$P_A$	pressione parziale del composto $A$ nella fase gassosa
$P_B$	è indicata la pressione barometrica [ $hP_a$ ]
$R$	la costante universale dei gas (0,08314 [ $bar \cdot L \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ])
$T_K$	la temperatura atmosferica [K]
$V_M$	il tasso di migrazione del metano [ $L^3 \cdot m^{-2} \cdot h$ ]
$V$	è il volume totale del sistema o volume di controllo della camera
$X_A$	concentrazione del composto $A$ nella fase liquida in equilibrio con quella gassosa [ $mol/m^3$ ]
$Z(x)$	Variabile regionalizzata (VR)

### SIMBOLI GRECI E OPERATORI MATEMATICI

<i>Simboli</i>	<i>Descrizione</i>
$\varphi$	il flusso di $CO_2$ attraverso il suolo
$\varphi_{in}$ e $\varphi_{out}$	flussi di $CO_2$ di ingresso e di uscita dalla camera di accumulo
$\mu$	la viscosità del gas ( $M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$ )
$\nu$	tasso di trasferimento di un gas per unità di area di sezione, ( $L \cdot T^{-1}$ )
$\nabla C_i$	il gradiente della specie gassosa considerata ( $M \cdot L^{-4}$ )
$\nabla P$	il gradiente di pressione, ( $M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2}$ )
$\partial[CO_2]_c / \partial t$	la variazione della concentrazione di $CO_2$ nel tempo all'interno dell'ambiente isolato

---

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

---

<i>Simboli</i>	<i>Descrizione</i>
BAT	Best available techniques
BREF	BAT REference
CA	Camera di Accumulo
EC	acronimo inglese <i>Eddy Correlation</i>
EDA	“Analisi Esplorativa dei Dati” ( <i>Exploratory Data Analysis</i> .)
ESDA	“Analisi Esplorativa Spaziale” ( <i>Exploratory Spatial Data Analysis</i> )
FA	Funzione Aleatoria
<i>f</i> C	<i>fattore di copertura</i>
FOS	<i>Frazione Organica Stabilizzata</i>
G-S	<i>Dispositivo fisso spia denominato Gas-Spy</i>
GPS	“ <i>Global Positioning System</i> ”
GWP	acronimo inglese Global Warming Potential
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IPPC	<i>Integrated Pollution Prevention and Control</i>
LfG	Biogas dall’acronimo inglese “Landfill Gas”
MMO	enzima Metano-mono-exigenasi
NMOC's	acronimo inglese di “ <i>non methane organic compounds</i> ”.
NNR	l'errore quadratico medio normalizzato della distribuzione dei rapporti normalizzati, dall’acronimo inglese “ <i>Normalised mean square error of the distribution of Normalized Ratios</i> ”
p.c.	Piano di campagna
PdA	Piano di Adeguamento.
PCI	Potere Calorifico Inferiore
PSC	Piano di Sorveglianza e Controllo
ppm	Parti per milione in volume
RDF	"Refuse Derived Fuel" (CDR)
RSU	Rifiuti solidi urbani
VOC	Composti Organici Volatili (dall’inglese <i>Volatile Organic Coumpounds</i> )
VFA	Acidi Grassi Volatili (dell’inglese <i>Volatile Fatty Acids</i> )
VLE	Valore limite di Emissione
VR	Variabile regionalizzata (Z(x))

## PREMESSA

---

Al fine di adempiere agli obblighi normativi in materia di impianti di discarica, in un’ottica di controllo e quantificazione dei gas climalteranti soprattutto dal punto di vista del mercato delle emissioni (Emission Trading) risulta necessario individuare una *procedura* di quantificazione delle emissioni diffuse *verificabile e ripetibile*, indipendente dalle condizioni locali e gestionali dell’impianto di discarica di rifiuti urbani.

Ad oggi dal punto di vista tecnico-normativo non sono fornite precise indicazioni su come valutare le emissioni e definire i livelli di accettabilità per gli impianti di discarica. Lo scopo ambizioso del presente lavoro di tesi è quindi prioritariamente quello di sopperire a tale mancanza, e dare impulso, in un settore nel quale le esperienze di metodi di monitoraggio non danno ad oggi un quadro sufficientemente chiaro ed esaustivo, ad uno approccio di collaborazione fra Enti di ricerca, Autorità di Controllo e Associazioni di categoria dei Gestori per stilare un *protocollo condiviso e standardizzato delle emissioni gassose degli impianti di discarica*.

Secondo quanto premesso è risultato di primaria importanza condurre una analisi comparata in seno ai diversi metodi di misura e controllo delle emissioni diffuse dalle discariche in tutte le forme, siano queste emesse in atmosfera o nel terreno, ed in seguito anche della dipendenza della efficacia di tali metodologie al variare delle condizioni che definiscono i criteri realizzativi e gestionali delle discariche. L’obiettivo di questo studio è quello di ottenere una procedura di misura standardizzata in grado di fornire elementi informativi atti a limitare gli impatti ambientali e *massimizzare le eventuali opportunità di recupero energetico* da fonti rinnovabili.

Da qui la scelta del titolo del presente lavoro di tesi: “*Sistemi di monitoraggio delle emissioni diffuse di biogas da discarica per la ottimizzazione del sistema di gestione*” tramite il quale si vuole porre in evidenza la stretta dipendenza che i **controlli** ambientali possono avere sul sistema di gestione degli impianti smaltimento rifiuti.

### *Filosofia alla base del presente lavoro di tesi*

In Italiano nella maggior parte dei casi con il termine “controllo” si indicano le azioni volte a verificare che una grandezza sia affettivamente rispondente alle richieste. Nell’accezione anglosassone il termine “control” implica invece il condizionamento di una variabile parametrica ad operare nei range voluti. Controllare un processo significa, quindi, sia

misurare nel senso di verificare le grandezze fisiche, come ad esempio il controllo di prodotto nei sistemi di gestione della qualità, sia imporre le condizioni di operatività ad un processo controllandone in modo retroattivo i parametri in gioco (Cappetta, 2001).

Tali concetti, che stanno alla base delle logiche del mercato, sono il propulsore di una tensione continua che è volta al miglioramento dei *processi produttivi*.

Se andiamo ad assimilare un impianto di discarica ad un processo produttivo - cosa peraltro lecita - si possono considerare come input *i rifiuti* (selezionati dal Legislatore tramite i Criteri di Ammissibilità) e come output *gli Impatti Ambientali* ai quali sono applicati numerosi controlli.

Di particolare interesse per il controllo del “processo discarica” risulta lo strumento normativo-autorizzatorio denominato “*Piano di Sorveglianza e Controllo*” ai sensi del D.Lgs 36/2003, ovvero quell’insieme di azioni tramite le quali si vanno a verificare gli impatti sui comparti ambientali: aria, suolo e acqua. Il processo di degradazione del rifiuto, e quindi l’attività batterica connessa, dà luogo alla formazione di gas formato per il 50% in volume da metano. Tramite un sistema definito a *multi-barriera* (Cossu, 2007) sono messi in opera dispositivi preposti alla veicolazione, captazione trattamento e utilizzo del biogas quale combustibile.

Monitorare le emissioni di biogas diffuse dalla superficie della discarica e nei terreni limitrofi diviene pertanto un processo di controllo a retroazione volto alla riduzione degli impatti e alla ottimizzazione del potenziale energetico.

Un corretto monitoraggio deve quindi essere in grado di fornire quelle informazioni atte a suggerire interventi gestionali e di post-progettazione in grado di ridurre e/o eliminare le emissioni di biogas.

È doveroso specificare che l’attuale concetto di “discarica” per essendosi evoluto negli ultimi decenni, presenta comunque forti limiti inerenti al controllo delle variabili. Gli input – i rifiuti – possono avere differenti nature e caratteristiche (biodegradabilità, composizione, pretrattamenti, provenienza, tipo di raccolta) e i fenomeni che condizionano i processi di degradazione (spesso di natura aleatoria, come le precipitazioni) portano ad avere una ridotta sensibilità del processo ai condizionamenti gestionali.

Per questo, anche in letteratura scientifica, sono sempre più presenti i concetti di Bioreattore e di Digestore Anaerobico nei quali aumenta la possibilità di controllo dei parametri di processo, ossia la qualità del rifiuto in entrata, l’umidità interna al masso dei rifiuti oltre alla capacità di veicolazione del biogas verso gli utilizzatori.

# 1      CAPITOLO I: IL BIOGAS DA DISCARICA E I METODI PER LA MISURA DI FLUSSI DI GAS ATTRAVERSO SUPERFICI POROSE

---

## 1.1    INTRODUZIONE

---

A livello europeo come pure nazionale, l'opzione dello smaltimento dei RSU in discarica controllata rappresenta il sistema predominante. Secondo i dati statistici ufficiali (ISPRA/APAT-ONR, 2008) ben il 46,7% dei RSU italiani sono stati destinati ai trattamenti in discarica, tale valore è in linea con quello europeo che risulta intorno al 40% (quale media, al 2006, nella configurazione con quindici stati membri UE) (ISPRA/APAT-ONR, 2008).

La sempre maggiore sensibilità sui problemi ambientali ha focalizzato l'attenzione sui rischi connessi alle discariche; tra questi, certamente vanno annoverati quelli (su piccola e larga scala) correlati alla produzione di biogas (in termini possibili di emissione odorose, rischi di esplosione e/o incendi, generazione di condizioni di asfissia, emissioni di composti organici volatili, danni locali alla vegetazione, effetti globali su riscaldamento climatico ed impoverimento dell'ozono (Cossu 2003; Cossu et al., 1997; Gandolla et al., 1997; Lewis et al., 2003; Muntoni, 2000). Peraltro, a livello normativo, la Direttiva europea 1999/31/CE (relativa alle discariche di rifiuti), come pure la sua attuazione italiana nella forma del D.Lgs n. 36/2003, puntualizzano espressamente la necessità di *controllo e gestione* adeguati (in entrambi le fasi temporali: *operativa e post-operativa*) delle discariche (per prevenire o almeno ridurre, i potenziali effetti negativi su ambiente e salute umana), ponendo l'attenzione sulla necessità di monitoraggio non soltanto qualitativo, ma anche quantitativo del gas di discarica. Sulla delicata questione della gestione e controllo del biogas, appare *concretamente utile la messa appunto, codifica procedurale ed applicazione a scala reale di tecniche, auspicabilmente accurate e convenientemente rapide, per la misura dei flussi gassosi da discarica* (Capaccioni B. et al., 2005). In questo capitolo dopo aver definito il biogas o *gas da discarica* (come da nomenclatura del D.Lgs n. 36/2003), vengono descritti i principali metodi di misura per flussi gassosi da discarica come da letteratura tecnico-scientifica, mettendone in risalto le principali caratteristiche.

## 1.2    CONTESTO NORMATIVO

---

Con il recepimento della direttiva 1999/31/CE e l'applicazione del D.lgs. 36/2003 relativo alle discariche di rifiuti, si pone l'attenzione alla problematica delle emissioni diffuse e al monitoraggio e controllo delle stesse. Particolare risalto è dato alla predisposizione, secondo quanto proposto anche dalla *direttiva IPPC* (in Italia D.Lgs 59/2005), all'allestimento di un

*piano di monitoraggio adeguato al controllo delle emissioni. Peraltro l'incidenza teorica delle discariche non è trascurabile, posto che a livello europeo essa è ad esempio stimata in ben il 30% delle emissioni antropogeniche di metano (Huber-Humer, 2004).*

*Ad oggi non vi sono metodologie standard di monitoraggio e controllo a livello nazionale ed anche a livello regionale le modalità di controllo richieste ai sensi del rispetto del D.Lgs. 36/2003 sono diversificate in maniera anche sostanziale, in ragione delle diversificazione degli approcci a livello di singoli enti autorizzatori.*

---

### 1.2.1 LANDFILL DIRECTIVE

---

L'utilizzo della discarica viene regolato dalla Direttiva CEE del 26 Aprile 1999, la quale fornisce la definizione del termine come *"area di smaltimento dei rifiuti adibita al deposito degli stessi sulla o nella terra.."* e propone una classificazione delle discariche in tre categorie sulla base dei rifiuti da recepire: *discarica per rifiuti pericolosi, per rifiuti non pericolosi, per rifiuti inerti.*

Il decreto in questione evidenzia la necessità di prescrivere, a livello comunitario, norme tecniche per l'interramento dei rifiuti adottando misure adeguate per evitare l'abbandono, lo scarico, lo smaltimento incontrollato dei rifiuti e considerando che bisogna dare importanza *sia alla fase operativa che a quella post-operativa* di una discarica e a questo proposito considera necessario il definire quando e come una discarica debba essere chiusa.

Inoltre l'ottica in cui si inserisce il decreto è quella di incoraggiare la prevenzione, il riciclaggio e la valorizzazione dei rifiuti nonché l'impiego dei materiali e della energia recuperati al fine di risparmiare le risorse naturali e di economizzare l'uso del terreno.

La Landfill Directive pronta fin dal 1991 ha avuto non pochi contrasti in fase di approvazione, date per lo più dall'intransigenza da parte dell'Inghilterra, tutt'oggi è una norma molto discussa e varie associazioni e organi di ricerca propongono modifiche sostanziali.

Nel corso del 2009 la *Sustainable Landfill Foundation* ha presentato una proposta di modifica del capitolo 4 (controllo dei gas) dell'Allegato I (requisiti generali per tutte le categorie di discariche) della Direttiva europea 99/31/CEE.

Le emissioni di metano da discarica in Europa sono stimate in circa 100 Mtonne CO<sub>2</sub>-eq/anno. Con la proposta di modifica del paragrafo 4 dell'allegato I della Sustainable Landfill Foundation viene proposta, una riduzione delle emissioni di oltre il 90% quantificabile in circa 6,5 Mtonne CO<sub>2</sub>-eq/anno. In aggiunta alla riduzione effettiva delle emissioni una quantità significativa di carbonio è stoccato nella discarica. Attraverso produzione di energia da fonti rinnovabili ovvero attraverso il recupero del gas raccolto in discarica è possibile generare una ulteriore riduzione di emissioni evitate di 10 Mtonne CO<sub>2</sub>-eq/anno. In conclusione l'introduzione di regole per l'ottimizzazione del recupero del gas di discarica si tradurrebbe in una riduzione netta di circa 25 Mtonne CO<sub>2</sub>-eq/anno. Di seguito si riporta la proposta fatta che mira a realizzare una situazione in cui le discariche non sono più contribuenti alle emissioni di gas serra. Per fare questo è importante facilitare la produzione

di energia da gas di discarica. L'argomento centrale potrebbe essere incentrato sul fatto che una emissione superiore potrebbe essere compensata da un risparmio di combustibili fossili (van Zomeren et al., 2005).

Altra tematica inespressa nella Landfill Directive da sottolineare riguarda la mancanza di definizione dei VLE. Nella proposta sono riportati dei possibili valori distinguendo i limiti di emissioni diversi per discariche in fase di gestione e per quelle in fase di post-gestione.

Questo non riguarderebbe le discariche che sono state completate prima del 16 luglio 2009. Per le discariche che sono in gran parte costruite sotto la giurisdizione della Landfill directive e che saranno chiuse diversi anni dopo il momento dell'adozione (ad esempio dopo il 2014) si potrebbe ritenere opportuno che rispettino pienamente i valori di emissione della proposta. Infine è necessario sottolineare che metodi oggi affidabili e precisi per valutare le emissioni di metano non esistono. *Uno sforzo per migliorare e armonizzare le metodologie è necessario al fine di stabilire condizioni di parità in Europa.*

Proposte di modifica alla Landfill Directive (in corsivo le modifiche).

4.	<b>Gas control</b>
4.1	Appropriate measures shall be taken in order to control the <i>emission</i> <del>accumulation and migration</del> of landfill gas <i>into the atmosphere</i> (Annex III).
4.2	<i>No later than four years after entry into force of this amended Annex I the methane emission of landfills shall not exceed:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>6.3 kg methane per m<sup>2</sup> and year as average and 12.5 kg methane per m<sup>2</sup> and year from specific cells on landfills in operation;</i></li> <li>- <i>1.6 kg methane per m<sup>2</sup> and year as average and 3.4 kg methane per m<sup>2</sup> and year from point-sources on closed landfills within two years after operation has ceased.</i></li> </ul>
4.3	<i>No later than eight years after entry into force of this amended Annex I the methane emission of landfills shall not exceed:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>3.1 kg methane per m<sup>2</sup> and year as average and 6.3 kg methane per m<sup>2</sup> and year from specific cells on landfills in operation;</i></li> <li>- <i>0.8 kg methane per m<sup>2</sup> and year as average and 1.6 kg methane per m<sup>2</sup> and year from point-sources on closed landfills within two years after operation has ceased.</i></li> </ul>
4.4	Landfill gas shall be collected from all landfills <i>with the exception of landfills</i> receiving <i>less than 40 kg biodegradable carbon per tonne of waste (wet basis) on an annual basis or landfills with a gas production lower than 3.1 kg methane per m<sup>2</sup> and year. On such landfills the gas can either be collected and flared or passively oxidised with a sufficient methane conversion efficiency to meet the limit values of paragraphs 4.2 and 4.3.</i>  <i>If the gas production is between 3.1 and 15.6 kg methane per m<sup>2</sup> and year and the energy content of the collected gas is less than 1.0 MW, the gas collected must be flared or oxidized with another technology with a methane conversion efficiency of at least 95%.</i>  <i>If the gas production is higher than 15.6 kg methane per m<sup>2</sup> and year and the energy content of the collected gas is higher than 1.0 MW, and the landfill gas will be treated and used to produce energy if relevant in the local economical and technical context. If the gas collected cannot be used to produce energy, it must be flared.</i>
4.5	The collection, treatment and use of landfill gas under paragraph 4.2 <del>4</del> shall be carried on in a manner which minimises damage to or deterioration of the environment and risk to human health.

Tabella 1.1: Proposte di modifica alla Landfill Directive da parte della Sustainable Landfill Foundation (2009)

---

## 1.2.2 D.LGS 36/2003

---

Nel D.lgs. 36/2003 ,allegato 2, si definiscono le modalità gestionali e le procedure comuni di sorveglianza e controllo durante *le fasi di vita della discarica*, al fine di prevenire qualsiasi effetto negativo sull'ambiente e individuare opportune misure correttive.

Ai fini dell'allestimento di un piano di monitoraggio o *Piano di Sorveglianza e Controllo (PSC)* delle emissioni gassose occorre controllare che:

1. i processi di stabilizzazione all'interno della discarica avvengano regolarmente;
2. i sistemi di protezione e gli organi addetti alla captazione dei gas siano efficaci;
3. la misura delle emissioni sia condotta periodicamente verificando che non siano superate le soglie di accettabilità opportunamente definite;
4. sia misurata la quantità di biogas prodotta ed estratta dalla discarica.

Al punto 5.4 dell'allegato 2, si definiscono due tipi di emissioni gassose che seguono distinti procedimenti di controllo:

- ❖ le emissioni catturate dal sistema di captazione, cosiddette *convogliate*;
- ❖ le emissioni che sfuggono al controllo di gestione, definite *diffuse*, che sono disperse nel suolo e nel sottosuolo circostante la discarica oltre che in atmosfera.

Per riassumere la filosofia del D.lgt 36/2003 in merito al controllo delle emissioni gassose si cita il punto 2.5 dell'allegato 1:

*“La gestione del biogas deve essere condotta in modo tale da ridurre al minimo il rischio per l'ambiente e per la salute umana; l'obiettivo è quello di non far percepire la presenza della discarica al di fuori di una ristretta fascia di rispetto.”*

### 1.2.2.1 GESTIONE DELLE COPERTURE

---

Nell'ambito delle azioni del presente lavoro non potranno non essere prese in considerazione, ai fini della concretezza e riproducibilità immediata ed eventuali dei risultati, i dettami di legge attualmente vigenti. In particolare il D.lgs 36/2003 (in attuazione del 31/99/CE) in materia di coperture definitive da discarica, fornisce indicazioni precise e stringenti in merito ai criteri realizzativi. La copertura definitiva è pensata dal legislatore quale strumento progettato e realizzato allo scopo di isolare il corpo dei rifiuti dall'ambiente esterno, in modo da minimizzare le infiltrazioni di acqua. In aggiunta a tal fine, il legislatore evidenzia la necessità che la copertura riduca al minimo i fenomeni di erosione e di subsidenza localizzata, quest'ultimi strettamente correlati i cedimenti del rifiuto.

Al punto 1.2 dell'allegato 1 del D. Lgs 36, sono elencate caratteristiche della struttura multistrato, che deve essere costituita almeno dai seguenti:

1. strato superficiale di copertura con spessore maggiore o uguale a 1 m che favorisca lo sviluppo delle specie vegetali di copertura ai fini del piano di ripristino ambientale e fornisca una protezione adeguata contro l'erosione e consenta di proteggere le barriere sottostanti dalle escursioni termiche;
5. strato drenante con spessore maggiore o uguale a 0.5 m in grado di impedire la formazione di un battente idraulico sopra le barriere di cui ai successivi punti 3) e 4);



6. strato minerale superiore compattato di spessore maggiore o uguale a 0.5 m e di bassa conducibilità idraulica;
7. strato di regolarizzazione per la corretta messa in opera degli elementi superiori e costituito da materiale drenante.

Tale struttura multistrato risulta difficile da realizzare nelle discariche in pendio o comunque in scarpata, qualora le pendenze favoriscano fenomeni di scivolamento del masso drenante (punto 2).

In letteratura si trova traccia di numerosi spunti critici in merito alla concezione di copertura proposta dal legislatore, sta negli ultimi anni prendendo campo il concetto della cosiddetta “*Discarica Sostenibile*” (Cossu, 2007) con la quale si cerca di promuovere il concetto di *discarica aperta*.

### *Discussione*

Sulla base dei dati disponibili di letteratura scientifica internazionale e delle esperienze accumulate nella presente ricerca, *si evidenzia l'enorme importanza che hanno le coperture giornaliere ma soprattutto definitive nell'attenuare modificandole sia in termini quantitativi che qualitativi le dispersioni incontrollate di biogas*. Ciò che è ampiamente verificato, anche attraverso misure ad hoc di flussi di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, l'importanza di copertura “*reattive*” ovvero sia coperture costituite da materiali (sia biologici che non) in grado di interagire attraverso meccanismi di tipo chimico/biochimico e fisico con le specie chimiche presenti nel biogas. Il primo importante verificato effetto di tali tipi di coperture è l'ossidazione di una significativa frazione di CH<sub>4</sub> e la sua conversione in CO<sub>2</sub>. Ciò avviene però solo in presenza di flussi complessivi di biogas al di sotto di una certa soglia, superata la quale il biogas fuoriesce pressoché inalterato. E' per questa ragione che si intende verificare come le diverse modalità di copertura possano incidere in maniera notevole sull'effetto di riduzione delle fughe delle componenti metanogene del biogas.

#### 1.2.2.2 GESTIONE DEL BIOGAS

---

Attualmente le modalità di gestione del biogas delle discariche di rifiuti non pericolosi è dettato dal D.Lgs 36/2003. L'attenzione è posta in modo sistematico su: *l'adeguata progettazione, realizzazione e manutenzione del sistema di captazione del biogas, sistema, che deve mantenere le funzionalità in tutte le fasi di vita della discarica*. Tale sistema di captazione ha lo scopo di mettere in depressione il corpo di discarica e quindi eliminare le emissioni odorose, ridurre l'impatto sul comparto aria, e inviare a recupero energetico o a trattamento in torcia il gas captato.

Secondo il D.Lgs 36/2003, il sistema di captazione si compone di pozzi o dreni preposti al convogliamento del gas interno al corpo dei rifiuti, di una rete principale e/o secondaria di convogliamento, di una o più centrali di aspirazione e degli utilizzatori finali.

Le tecnologie utilizzate per la realizzazione della rete di captazione sono molteplici, in seguito all'approvazione dei piani di adeguamento delle discariche già esistenti ante D.lgt. 36/2003, la trivellazione di pozzi di biogas verticali è stata la scelta progettuale più comune e pratica da attuare, ma non la migliore dal punto di vista dell'efficienza.

## Discussione

In realtà anche dalla letteratura scientifica si deduce che la realizzazione di dreni orizzontali a supporto dei pozzi verticali realizzati in fase di gestione (con fondamenta nel masso drenante), porti ad un aumento e omogeneizzazione del gradiente di pressione all'interno del corpo dei rifiuti (Damiani et al., 1992). Molte sono le proposte progettuali sviluppabili in merito, anche se è facile capire che non vi è un buon sistema di captazione senza *un adeguato controllo delle funzionalità e della efficienza*. Sarà in funzione del controllo delle emissioni e dei parametri che influenzano il sistema (pressioni atmosferica, composizione del biogas) che il dato progettuale verrà modificato e migliorato al fine di aumentare l'efficienza potenziale.

Da affiancare a tale controllo (inteso come un ***feed-back gestionale***) vi sarà, quale strumento di ottimizzazione, anche lo studio e il monitoraggio dei *battenti di percolato* che, secondo la normativa vigente, devono essere minimizzati. A tal proposito si deduce dalla letteratura, che l'installazione di eiettori o pompe per il rilancio del percolato, all'interno dei pozzi di biogas verticali, ne aumenta la portata potenziale del gas attesa.

Nell'ultimo decennio la discarica controllata, come pensata nel D.lgt. 36/2003, è di fatto superata dal concetto di *bioreattore*, ovvero una discarica in cui il controllo da parte del gestore dell'umidità del rifiuto, attraverso il ricircolo del percolato, porta alla riduzione delle cinetiche di degradazione del rifiuto e una lisciviazione del carico inquinante, con il fine ultimo di minimizzare gli impatti potenziali della discarica nella fase di post-gestione (Cossu 2007; Valencia et al., 2009).

---

### 1.2.3 LINEE GUIDA AL MONITORAGGIO

---

Al fine di predisporre un piano di monitoraggio ottimale sono da considerare i seguenti punti (APAT - ARPA - APPA 2003):

1. obiettivi del monitoraggio e il perchè si controlla;
2. chi realizza il monitoraggio ovvero chi è il soggetto responsabile (che generalmente è divisa fra autorità competenti e gestori).
3. cosa e come monitorare; ovvero la scelta dei parametri e delle metodologie;
4. come esprimere il Valore limite di Emissione (VLE) e i risultati dei monitoraggi;
5. il tempo e la frequenza di monitoraggio;
6. come trattare i dati incerti (e conoscere il grado di incertezza delle misure).

Secondo le linee guida europee per l'IPPC con i termini "*monitoraggio*" e "*controllo*" si intende l'osservazione sistematica delle variazioni di alcune caratteristiche chimiche e fisiche dei parametri che si intende monitorare. Il monitoraggio e il controllo sono basati su misure o osservazioni ripetute con una frequenza adeguata, secondo procedure stabilite e documentate. Tali informazioni possono essere usate sia per la *verifica di conformità con i limiti di emissione* e/o per *verificare il corretto funzionamento dell'impianto* e quindi a supporto delle relative operazioni industriali.

Più in generale un monitoraggio ben progettato e applicato dovrebbe generare dati ***comparabili e affidabili***.

È essenziale una buona conoscenza del processo da monitorare per ottenere risultati che siano affidabili e comparabili.

L'*affidabilità dei dati* può essere definita come la correttezza, o lo scostamento rispetto al vero valore, e dovrebbe essere appropriata all'uso degli stessi. Insieme ai dati, dovrebbero essere disponibili informazioni sull'incertezza, sull'accuratezza dei sistemi, sugli errori, sulla convalida dei dati.

In un ottica di **armonizzazione delle procedure in tutta Europa** diviene indispensabile la standardizzazione delle procedure e l'attenzione alla comparabilità del dato in differenti impianti e contesti climatici.

#### 1.2.3.1 CRITERI METODOLOGICI PER L'ANALISI DI RISCHIO DELLE DISCARICHE

---

Per contestualizzare quegli elementi che vanno a comporre un quadro di conoscenza iniziale al fine di allestire un monitoraggio delle emissioni da discarica si fa riferimento a quelle che sono le metodiche utilizzate per l'analisi di rischio (Apat, 2005).

In prima analisi, al fine di caratterizzare la sorgente potenziale di inquinamento " discarica" sono necessarie delle informazioni che possono essere divise nei seguenti gruppi:

1. storia della discarica e generalità
2. caratteristiche geometriche (volume, capacità ecc...)
3. tipologia dei rifiuti
4. caratteristiche quali-quantitative delle emissioni
5. caratteristiche costruttive dell'impianto e sistemi tecnologici.

In seconda fase si procede alla caratterizzazione dei possibili percorsi attraverso i quali l'inquinante può raggiungere il bersaglio (*recettori*).

Nel caso in esame il biogas - individuato quale inquinante - può raggiungere il bersaglio per via aerea o tramite le fughe laterali del terreno.

In particolare i percorsi rispetto al biogas possono prendere in considerazione i seguenti fattori:

- ❖ emissioni incontrollate in atmosfera di biogas delle aree scoperte della discarica e trasporto per diffusione-dispersione;
- ❖ emissioni in atmosfera di biogas delle aree coperte e trasporto per diffusione-dispersione;
- ❖ emissioni in atmosfera provenienti dall'impianto di combustione/recupero del biogas;
- ❖ passaggio del biogas dalle barriere laterali della discarica e migrazione laterale nel sottosuolo insaturo
- ❖ perdite dovute ad occasioni accidentali:
  - danni al sistema di captazione;
  - danni alla torce o MCI.

Sempre in merito al percorso risultano utili le informazioni rispetto la geologia e idrologia dei terreni limitrofi alla discarica soprattutto in merito all'individuazione delle zone insature e alla granulometria del terreno.

Ultimo passo rispetto le definizione del contesto entro il quale predisporre le azioni di monitoraggio consiste nella individuazione dei bersagli/recettori che in particolare per quanto riguarda l'inquinante biogas sono:

1. l'atmosfera e l'ambiente (vegetazione circostante);
2. la qualità dell'aria e gli effetti globali in atmosfera (impoverimento dell'ozono, effetto serra);
3. uomo.

Per quanto riguarda l'uomo i luoghi possono essere: gli uffici del gestore, le abitazione domestiche, i capannoni industriali limitrofi.

*Queste informazioni sono prese in esame al fine di sviluppare il modello concettuale del monitoraggio illustrato di seguito.*

### 1.3 PROCESSI DI DEGRADAZIONE IN DISCARICA.

La discarica controllata può essere assimilata ad un *reattore biochimico* in cui i rifiuti depositati subiscono processi chimici, fisici e biologici molto complessi e dalla cui combinazione si producono dei residui solidi, liquidi e gassosi. Il principale meccanismo di degradazione è quello biologico che ha inizio quando i rifiuti vengono collocati in discarica agendo sulla parte organica. Tale meccanismo, comunque, è strettamente legato sia ai processi fisici che a quelli chimici che evolvono di pari passo (Cossu 2007).

I **processi fisici** consistono nella rottura e nella movimentazione dei rifiuti, nella variazione dell'umidità dei rifiuti, nel trasporto di particelle con l'acqua e nella diffusione di sostanze a causa di gradienti di concentrazione.

I **processi chimici** che concorrono alla degradazione del rifiuto includono l'idrolisi, la dissoluzione/precipitazione, assorbimento/desorbimento, scambio ionico. La degradazione chimica produce un'alterazione delle caratteristiche del rifiuto ed una maggiore mobilità dei componenti dei rifiuti, tendendo ad una maggiore uniformità delle caratteristiche chimiche della discarica.

I **processi biologici** hanno luogo grazie alla presenza naturale di alcune tipologie di batteri. Il processo è molto complesso dal momento che segue diverse fasi in sequenza e/o parallelo portando alla produzione di diversi prodotti (de Fraja Frangipane E., et al., 1995). Schematizzando si può affermare che la degradazione biologica in discarica è individuata da due fasi fondamentali: **aerobica** e **anaerobica**, durante le quali ad opera di microrganismi specifici che agiscono sulla frazione organica del rifiuto si ha la generazione una miscela gassosa chiamata **biogas** ("landfill gas", LFG, nella versione inglese del termine) e una miscela liquida, il **percolato** ("leachate", in inglese) formatosi dall'interazione dei prodotti della decomposizione con l'acqua meteorica infiltrata nella massa dei rifiuti.

#### 1.3.1 PRODUZIONE DI BIOGAS IN DISCARICA.

Il biogas viene prodotto dalla combinazione dei seguenti processi:

- ❖ volatilizzazione;
- ❖ degradazione biologica e processi biochimici.

### 1.3.1.1 VOLATILIZZAZIONE

Una discarica è un sistema che coinvolge le trasformazioni tra le tre fasi della materia: solida, liquida e gassosa. La volatilizzazione è il processo di transizione di una sostanza dalla fase liquida (*vaporizzazione*) o dalla fase solida (*sublimazione*) a quella di vapore. Le energie necessarie per queste transizioni di fase sono espresse dal calore molare di vaporizzazione nel primo caso, e dalla somma di quello di fusione e vaporizzazione, nel secondo. Senza che tale energia venga fornita al sistema, è comunque possibile che alcune molecole dalla fase liquida e solida ne possiedano a sufficienza per superare le forze coesive e transire allo stato vapore; l'entità di questo fenomeno, nel caso di una sostanza pura, è fissato dalla sua pressione di vapore. Quanto più è elevata la temperatura, quanta più energia le molecole hanno a disposizione, tanto più la pressione di vapore aumenta. Le azioni di volatilizzazione sono dovute al cambiamento di equilibrio fra le fasi che avviene in discarica: alcuni materiali presenti nei rifiuti tendono a liberare composti volatili generando gas e questo processo viene accelerato quando i rifiuti diventano biologicamente attivi con produzione di calore; infatti molti composti chimici presenti nei RSU mutano dalla fase solida o liquida in vapore alle elevate temperature che molto facilmente la discarica raggiunge (studi recenti attraverso carotaggi in sito hanno verificato un range di temperature comprese tra i 50-65°C con una crescita quasi lineare dopo i 3 metri di profondità). (Barina G., et al. 2003)

Le entità delle accelerazioni di questo processo dipendono dalla proprietà fisiche e chimiche dei composti, la più importante delle quali è la *costante di Henry*, che descrive la ripartizione di un composto organico fra la fase gassosa e la soluzione acquosa. Questa costante non è altro che il rapporto fra l'abbondanza del composto nella fase gassosa (espressa attraverso la pressione parziale) e nella fase acquosa all'equilibrio (espressa attraverso la concentrazione molare); a parità di condizioni, più un composto ha elevato valore della costante di Henry, più tenderà a volatilizzare.

La legge di Henry, che determina l'estensione della volatilizzazione di un contaminante disciolto nell'acqua, è data da:

$$P_A = H_A \cdot X_A \quad (1.1)$$

dove  $P_A$  è la pressione parziale del composto  $A$  nella fase gassosa,  $X_A$  è la concentrazione del composto  $A$  nella fase liquida in equilibrio con quella gassosa [mol/m<sup>3</sup>] e  $H_A$  è la costante di Henry, indica la tendenza di un composto a volatilizzare in atmosfera da una soluzione acquosa, come risultato combinato dell'influenza delle sue pressione di vapore e solubilità; questa costante dipende direttamente dalla temperatura. In generale, i composti liquidi che hanno costante di Henry maggiore di 10<sup>-3</sup> atm\*m<sup>3</sup>/mol vengono considerati di grande peso nella fase gassosa.

Secondo la legge di Henry il quantitativo di un gas che si può disciogliere in un certo volume di liquido ad una temperatura costante è direttamente proporzionale alla pressione parziale che il gas esercita sul liquido (Department Of The Army U.S., 1995) .

#### 1.3.1.2 DEGRADAZIONE BIOLOGICA E PROCESSI BIOCHIMICI

---

I meccanismi biochimici che caratterizzano la degradazione del rifiuto, portando alla formazione del biogas, sono descritti da due fasi principali:

- i. fase **aerobica**;
- ii. fase **anaerobica**;

Ciascuna delle due fasi ha le proprie esigenze di ambiente e substrato e forniscono differenti prodotti finali. Sebbene la prima fase di stabilizzazione del rifiuto avvenga in ambiente aerobico, è la digestione anaerobica che domina il processo sia per la durata, sia per il ruolo fondamentale che esercita nel processo di biostabilizzazione della matrice organica del rifiuto. Il passaggio dalla degradazione aerobica a quella anaerobica avviene mediante un'altra fase detta transitoria in cui inizia a scomparire l'ossigeno e si manifestano le prime condizioni anaerobiche. (Bogner J. E., et al. 1996)

Come mostrano la Figura 1.1 e la Figura 1.2, riportate di seguito, all'interno delle due fasi principali è possibile distinguere altre fasi di cui se ne fornisce una accurata descrizione nei prossimi paragrafi.

Ancora prima che la cella di coltivazione della discarica sia completa, il rifiuto solido umido, riceve svariati inoculi di batteri, actinomiceti e funghi. Questi organismi si sviluppano con una velocità di reazione che dipende dalle condizioni ambientali già presenti in discarica. La colonizzazione del substrato organico è influenzata dal tasso di umidità, dalla temperatura, dallo stato nutrizionale, dal pH, e dalla massa volumica del materiale presente. (Raco B., et al. 2006)

La formazione del biogas da discarica può essere schematizzata in cinque fasi come illustrato in Figura. 1.2 in cui sono ben evidenziati gli stadi aerobici e anaerobici.

##### i) Fase **aerobica** (I)

Inizialmente la fase gassosa della cella di una discarica è composta da gas atmosferici. La presenza di ossigeno dà inizio ai processi microbici aerobici che sono altamente esotermici. La decomposizione aerobica è per sua natura rapida, rispetto alla seguente decomposizione

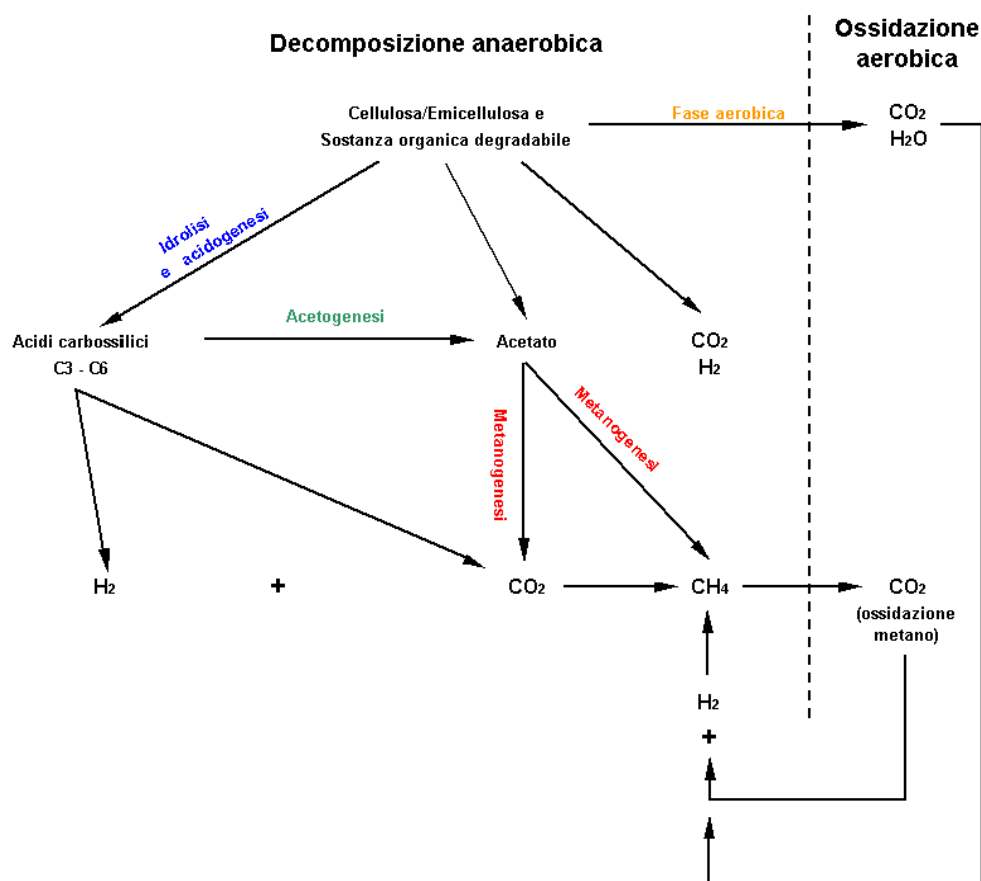


Figura 1.1: Schema generalizzato dei processi di biodegradazione che avvengono in discarica (Bogner J. E., et al. 1996).

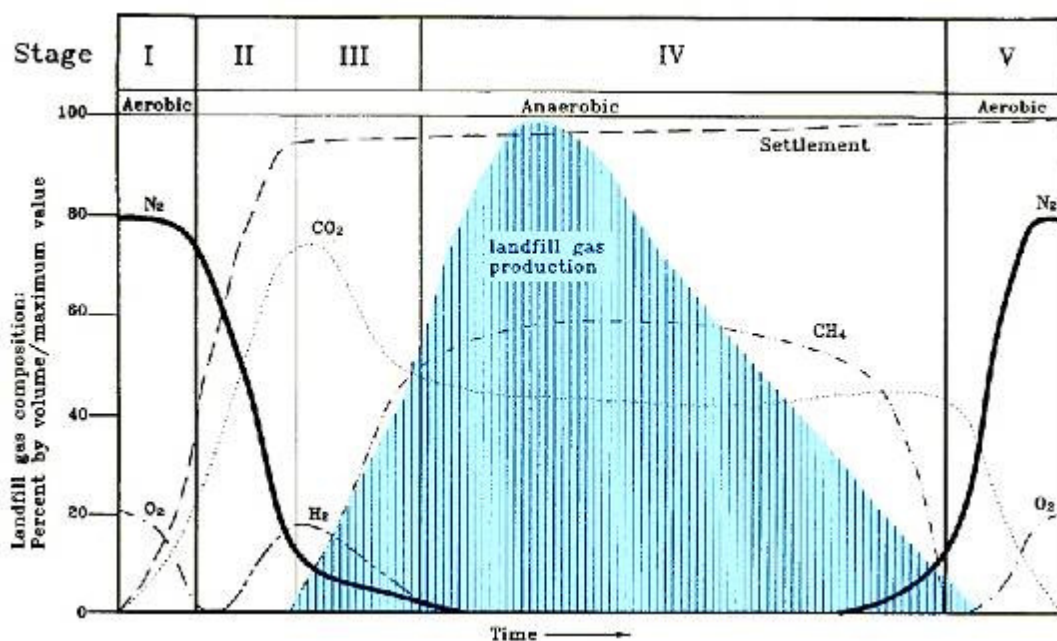


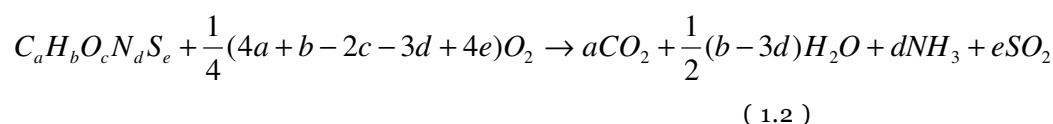
Figura 1.2: Evoluzione tipica della composizione del biogas nel tempo.

anaerobica, e la domanda di ossigeno da parte del refluo è alta (Raco B., et al. 2006). La reazione generale di questa decomposizione è:

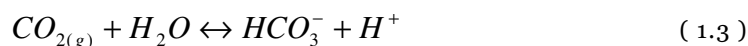
**Rifiuto degradabile + ossigeno  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + biomassa + calore + materiali  
parzialmente degradati**

Durante i processi esotermici i carboidrati vengono convertiti in acqua ed anidride carbonica. I microrganismi aerobici producono CO<sub>2</sub> in concentrazioni molto elevate, fino al 90% per temperature intorno ai 70°C. La cellulosa, per esempio, che costituisce la frazione organica quantitativamente maggiore, viene convertita a glucosio da enzimi extracellulari e successivamente acqua e anidride carbonica. I grassi attraverso la formazione intermedia di acidi volatili, sono idrolizzati ad acidi grassi e glicerolo. Le proteine, dapprima si degradano in amminoacidi e successivamente nei tipici cataboliti della degradazione aerobica: anidride carbonica, acqua, nitrati e solfati.

Un esempio di decomposizione aerobica per un costituente generale C<sub>a</sub>H<sub>b</sub>O<sub>c</sub>N<sub>d</sub>S<sub>e</sub> è (Tchobanoglous G., et al. 1993):



La formazione della anidride carbonica, in concomitanza con il consumo di ossigeno, porta via via ad un continuo aumento della pressione parziale dell'anidride carbonica in fase gassosa: questo incremento si manifesta indirettamente con l'acidificarsi della fase acquosa, secondo la reazione (de Fraja Frangipane E., et al., 1995; Damiani A., et al. 1992; Vismara et al., 2007):



*i) Fase **anaerobica**:*

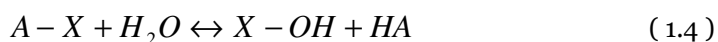
Una volta esaurito l'ossigeno ha inizio la fase anaerobica del processo di decomposizione favorita dalle condizioni interne della cella della discarica: pH acido, assenza di ossigeno, temperature elevate.

Gli stadi che caratterizzano la degradazione anaerobica sono:

- a) *idrolisi ed acidogenesi*;
- b) *acetogenesi*;
- c) *metanogenesi*;

a) *Idrolisi ed acidogenesi* (II): durante questa fase i composti ad elevato peso molecolare subiscono idrolisi mediate da enzimi, che portano alla formazione di composti a peso molecolare minore. Il processo enzimatico che porta alla decomposizione delle macromolecole di substrato solido in molecole più piccole richieste per la successiva conversione microbica (es. trasformazione di carbonati in zuccheri semplici, proteine in amminoacidi e lipidi in glicerolo e lunghe catene di acidi grassi) prende il nome di depolimerizzazione. Questo termine sarebbe in realtà più appropriato all'altro termine, idrolisi, poiché questo ultimo è solo una delle tante strade della depolimerizzazione, mediata da enzimi extracellulari secreti dai microrganismi; questi enzimi portano il nome di *Idrolasi* e agiscono da catalizzatori secondo la formula



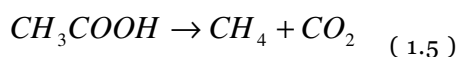


Con l'*acidogenesi* (fase acida instabile) che porta alla trasformazione dei prodotti del primo stadio in composti a peso molecolare ancora più basso (di solito acido acetico, acido fulvico e altri acidi organici più complessi) si ha l'intervento dei batteri *acidogeni*. In genere questa fase ha breve durata, da alcuni giorni fino a qualche settimana. In questo stadio si riscontra una iniziale produzione di  $H_2$  ad opera dei batteri anaerobi facoltativi presenti nella massa dei rifiuti. Le concentrazioni di  $H_2$  possono raggiungere alte percentuali, anche fino al 20% in volume, in seguito alla degradazione del carbonio organico ad acidi volatili ed  $H_2$ ; la percentuale in volume di azoto presente, invece, può variare in un range tra il 30% e il 50% (Connell Des W., 2005).

b) *acetogenesi* (III): è la fase acida stabile in cui i batteri fermentanti producono, a partire dalla sostanza organica disciolta, gli acidi grassi volatili (VFA, "volatile fatty acids"), etanolo, acido lattico, accompagnati da anidride carbonica ed  $H_2$ . Tali prodotti vengono ulteriormente trasformati in acido acetico ed  $H_2$  dai batteri acetogenici caratteristici di questa fase, che possono convertire anche composti aromatici contenenti ossigeno (acido benzoico, fenoli), ma non sono capaci di degradare gli idrocarburi aromatici (toluene, benzene).

La durata complessiva di questa fase può variare da qualche mese a due-tre anni (Damiani A., et al. 1992; Vismara et al., 2007)

c) *metanogenesi* (IV): è la fase di produzione del metano, perciò predominano i batteri metanigeni, anaerobici, che durante questa fase si stabilizzano e consumano il substrato prodotto nella fase precedente generando come cataboliti una miscela di metano e di biossido di carbonio, insieme ad altri composti in tracce. Il metano e il biossido di carbonio vengono prodotti in conseguenza della scissione dell'acetato, oppure per combinazione dell'idrogeno con l'anidride carbonica, secondo le reazioni:



Durante la fase metanigena stabile, l'idrogeno prodotto precedentemente viene consumato sia dai batteri propriamente metanigeni sia dai solfato riduttori; questo comporta una sostanziale diminuzione della concentrazione di  $H_2$  nel biogas (che può raggiungere al massimo percentuali del 5% in volume), al contrario delle concentrazioni di metano e anidride carbonica che invece si stabilizzano a percentuali in volume pari al 45-60% e 40-60%, rispettivamente. Poiché la fase metanigena stabile ha una durata di circa 30 anni, i biogas che presentano una composizione di questo tipo sono caratteristici di discariche in cui il processo di degradazione ha avuto tempo di evolversi, dando luogo ad una produzione di metano pressoché costante. In discariche giovani invece, in cui il processo di biostabilizzazione non ha ancora raggiunto la fase stabile, la composizione di biogas sarà caratterizzata dalla presenza di idrogeno, da concentrazioni di metano inferiori al 45%, e da concentrazioni di biossido di

carbonio ed di azoto maggiori rispetto a quelli che caratterizzano la fase metanogenica stabile (Raco B., et al. 2006; Damiani A., et al. 1992; Vismara et al., 2007).

Durante questa fase possono essere prodotti anche  $N_2$  e  $H_2S$ : il primo deriva dai processi microbici di denitrificazione, in cui lo ione nitrato viene ridotto, il secondo viene prodotto da microrganismi riduttori dello zolfo.

Fase di maturazione (V): una volta che la materia organica disponibile è degradata, la produzione di anidride carbonica e di metano inizia a diventare irrilevante, fino a quando non cessa e l'aria torna diffondersi nella discarica. Generalmente ci si aspetterebbe che la massa dei rifiuti in discarica evolvesse per tornare in questa fase ad un nuovo stato aerobico (il rateo di diffusione dell'ossigeno nei rifiuti eccede quello del consumo di ossigeno), anche se questi dati sono fortemente influenzati dal tipo di copertura finale scelta e dal suo grado di impermeabilità all'aria (Christensen T.H., et al., 1996). In dipendenza del tipo di copertura finale adottato dopo la chiusura della discarica il biogas può contenere percentuali di azoto e di ossigeno come è osservabile da Figura 1.2.

### 1.3.1.3 FATTORI CHE INFLUENZANO LA PRODUZIONE DI BIOGAS.

La produzione di biogas in discarica è governata da diversi fattori atmosferici, chimico-fisici, oltre che biologici, riconducibili a tre categorie degne di nota:

- ❖ natura e caratteristiche dei rifiuti,
- ❖ condizioni interne alla discarica,
- ❖ caratteristiche ambientali del sito in cui è localizzata la discarica.

<b>Caratteristiche dei rifiuti</b>	<b>Condizioni interne alla discarica</b>	<b>Caratteristiche ambientali</b>
composizione	umidità	temperatura dell'aria
granulometria	nutrienti	pressione barometrica
densità	temperatura	precipitazioni
pretrattamenti	ossigeno	regime dei venti
umidità del rifiuto	pH	insolazione

Tabella 1.2: Fattori che influenzano la produzione di biogas.

#### Caratteristiche dei rifiuti.

Importante è la composizione merceologica del rifiuto e la percentuale di sostanza organica biodegradabile effettivamente disponibile per la degradazione che dipende dal contenuto di cellulosa, emicellulosa e di lignina. Quest'ultima è un polimero complesso di glucosio che presenta catene di tipo celluloso difficilmente aggredibili da parte dei microrganismi, e si conserva più facilmente nel tempo tanto più è secca. Solo particolari enzimi posseduti dai alcuni insetti, le *ligninasi*, attaccano la lignina. La natura dei rifiuti influenza in modo significativo la composizione del biogas sia per quanto riguarda i macrocomponenti (metano ed anidride carbonica) sia per i composti in tracce. Per esempio, la decomposizione anaerobica della cellulosa dà luogo alla produzione di biogas con 50% di metano e 50% di anidride carbonica, quella delle proteine al 51,5% di metano e al 48,5% di anidride carbonica; infine la degradazione dei grassi dà luogo al 71,4% di metano ed al 28,6% di  $CO_2$ . La presenza

nei rifiuti di inquinanti facilmente gassificabili, quali solventi, liquidi refrigeranti, ecc., può dar origine ad emissioni di composti indesiderabili in tracce, come ad esempio composti alogenati o clorurati. La loro presenza, inoltre può causare una parziale inibizione della fase metanogenica stabile e quindi una conseguente diminuzione della percentuale di metano prodotto (Christensen T.H., et al., 1996).

Lo stesso si può verificare se la composizione dei rifiuti depositati presenta sostanze a carattere eccessivamente acido. Poiché i batteri metanigeni operano solo all'interno di uno stretto intervallo di pH compreso tra 6 e 8,5, nel caso in cui il valore del pH all'interno del corpo dei rifiuti sia minore di 6 e che in esso sia presente solfato, i batteri solfato-riduttori, che esplicano la loro attività in un intervallo di pH più ampio (tra 5 e 9), possono prevalere sull'azione dei metanigeni, degradando il substrato organico e producendo anidride carbonica.

Altro parametro da tenere in considerazione è il grado di vuoto che si stabilisce nella massa di RSU nella discarica; tra questi sono importanti la dimensione delle parti solide e il grado di compattazione determinati dalla gestione, dalla modalità di triturazione e compattazione, dalla qualità e quantità di materiale usato per il ricoprimento.

La densità del materiale ha degli effetti non trascurabili; infatti un aumento della densità comporta:

- ❖ riduzione della capacità di campo o meglio nota con la terminologia inglese come “*Field Capacity*”<sup>1</sup>;
- ❖ aumento della dispersione e distribuzione all'interno della massa dei rifiuti dei composti presenti nella fase acquosa;
- ❖ diminuzione della superficie di contatto liquido-solido e riduzione della biodegradazione.

#### Condizioni interne della discarica.

L'acqua presente nella discarica ha un ruolo fondamentale nella formazione del biogas poiché è il mezzo di trasferimento dei nutrienti, determina l'attività enzimatica ed esercita un'azione di diluizione sui reagenti. La formazione di biogas aumenta all'aumentare del tasso di umidità; le condizioni ottimali si hanno quando il tasso di umidità è pari o prossimo alla capacità di campo, se si sale al di sopra di tale valore non si hanno aumenti significativi nella produzione di biogas. Nel corso della degradazione l'umidità varia in funzione del bilancio tra

---

<sup>1</sup> Nella scienza geotecnica con il termine capacità di campo si indica la massima percentuale di umidità del terreno per unità di volume che un terreno può trattenere contro la forza di gravità. Superata la capacità di campo del terreno in esame, l'acqua scorre via liberamente. La capacità di campo varia da circa il 5% per terreni sabbiosi a circa il 30% per terreni secchi. Analogamente, i rifiuti solidi (nelle discariche) avranno una FC che decresce con l'aumentare della pressione.

I rifiuti solidi cittadini non compattati hanno una FC di circa il 50 - 60%. Una equazione empirica per ricavare la “*Field Capacity*” è:

$$FC = 0.6 - 0.55 ( W / 4500 + W )$$

dove:

FC = capacità di campo, % del peso della sostanza secca dei rifiuti;

W = aumento di peso calcolato a metà altezza del carico dei rifiuti, in kg.

In sintesi la FC è il contenuto volumetrico di acqua del suolo sottoposto ad una suzione di 0,33 bar o il contenuto volumetrico dopo un periodo prolungato di esposizione alla forza di gravità con conseguente drenaggio dell'acqua in eccesso (Pecorini, 2005)

acqua apportata dalle precipitazioni o dalle reazioni di degradazione e l'acqua consumata per evaporazione o reazioni.

I nutrienti per la crescita cellulare devono essere disponibili in quantità sufficiente, nelle forme chimiche utili e in certe proporzioni ben definite. Per nutrienti è solito riferirsi all'azoto e al fosforo ma anche lo zolfo, calcio, magnesio, potassio, ferro, zinco, cobalto e rame, cioè i micro-nutrienti, si sono rilevati utili durante l'assimilazione anaerobica.

Un ruolo chiave nel processo di formazione del biogas è svolto dalla temperatura. I batteri possono essere classificati in base alla temperatura in :

- ❖ psicrofili, 12-18°C
- ❖ mesofili, 25-45°C
- ❖ termofili, 55-65°C

La temperatura ottimale per la produzione di biogas è compresa tra 32 e 35°C; valori superiori a 75-80°C possono interrompere la produzione di metano, mentre le basse temperature rallentano l'attività batterica (Damiani A. et al. 1992).

L'assenza di ossigeno nella matrice della discarica è la condizione primaria per lo sviluppo dei batteri metanigeni; l'ossigeno atmosferico può comunque diffondere nello strato più superficiale ed essere richiamato all'interno della massa di RSU dalle depressioni create dall'impianto di captazione del biogas.

Il pH ottimale per la formazione del biogas è di 7-7,2; pH maggiore di 8 o inferiore di 6 inibiscono l'attività batterica. Il pH è influenzato dall'anidride carbonica che si forma inizialmente e che solubilizzandosi in acqua genera un ambiente acido. La presenza di sostanze a carattere tampone all'interno dei rifiuti migliora la possibilità di mantenere nella discarica un valore di pH ottimale per lo sviluppo della fase metanogenica stabile (Cossu R., et al. 2005).

### Caratteristiche ambientali

In base al tipo di terreno impiegato per la copertura l'influenza esercitata dalla temperatura dell'aria ha diversi effetti: se il terreno adottato è permeabile all'aria la temperatura non solo agisce sugli strati più superficiali dei rifiuti ma anche in quelli a maggiore profondità, se invece la copertura è impermeabile il corpo interno della discarica rimane isolato per cui la temperatura dell'aria non esercita nessun effetto sull'ammasso dei rifiuti. Se ne deduce che una marcata dipendenza dalla temperatura si ha nello strato superficiale dei terreni, dove si verifica la maggiore aerazione. Nei Paesi dove la temperatura scende sotto i 10°C l'attività biologica dei batteri viene drasticamente ridotta tanto da considerare assente l'ossidazione in questo strato. Esperimenti condotti da Bergmann et al. [1993] hanno però dimostrato una certa capacità ossidativa dei terreni anche a temperature piuttosto rigide. I massimi valori di ossidazione si hanno invece per temperature comprese tra i 26 e i 36°C. (Christensen T.H. et al., 1996; Damiani A. et al. 1992; Vismara et al., 2007).

Finché i rifiuti non sono consolidati alla densità tipica del suolo, la pressione barometrica può agire sullo strato più superficiale trascinandovi dentro aria o scaricando gas fuori dallo strato;

il vento può influenzare la diffusione negli strati profondi riducendo la concentrazione superficiale dei componenti dei gas; le precipitazioni influiscono drammaticamente sui processi di generazione del gas rifornendo acqua al processo e portando ossigeno disciolto nel *bulk* della massa. Quando l'acqua percola all'interno della massa vengono anche estratti composti organici e metalli pesanti (McBean E.A., et al., 1995).

#### 1.3.1.4 COMPOSIZIONE DEL BIOGAS

Il biogas è inizialmente composto in prevalenza da anidride carbonica ed idrogeno, prodotti della fase di idrolisi ed acidogenesi. Successivamente, quando si instaura la fase stabile metanogenica, il biogas ha una composizione che è rappresentata per la maggior parte da metano ( $\text{CH}_4$ ) e anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) ed in percentuali minori sono presenti vapore acqueo ( $\text{H}_2\text{O}$ ), azoto ( $\text{N}_2$ ) ed idrogeno solforato ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Infine, possono essere presenti vari e numerosi composti in tracce, con concentrazioni dell'ordine dei  $\mu\text{g/l}$  o inferiori, si tratta essenzialmente di VOC (*Volatile Organic Compounds*).

Per comprendere meglio la pericolosità delle fughe incontrollate di biogas e quindi la necessità di un monitoraggio, come impone il D.Lgs. n. 36, dopo avere riportato in Tabella 1.3 i componenti principali, nella Tabella 1.4 ne vengono riportate le caratteristiche.

Componente	Formula	Gandolla et al.,1986; Hame Barlaz, 1987(*)	
<b>metano</b>	$\text{CH}_4$	45-65% vol	
<b>anidride carbonica</b>	$\text{CO}_2$	65-45% vol	
<b>monossido di carbonio</b>	$\text{CO}$		
<b>idrogeno</b>	$\text{H}_2$	0% vol	(20-30%)
<b>ossigeno</b>	$\text{O}_2$	0% vol	(max 20%)
<b>azoto</b>	$\text{N}_2$	10-0% vol	(max 80%)
<b>idrogeno solforato</b>	$\text{H}_2\text{S}$	tracce	
<b>acqua</b>	$\text{H}_2\text{O}$	2-5% vol	
<b>ammoniaca</b>	$\text{NH}_3$		
(*)Biogas emesso durante la fase stabile di metanogenesi			

Tabella 1.3: Costituenti principali del biogas (i valori tra parentesi sono da considerarsi anomali) (Damiani A. et al.,1992)

A volte è possibile riscontrare valori anomali nella composizione: ad esempio si può avere la presenza di idrogeno al 20-30% per un breve periodo subito dopo il deposito dei rifiuti, oppure la presenza di alte concentrazioni di ossigeno (20%) o di azoto (80%) possono essere causate dall'infiltrazione di aria all'interno della massa dei rifiuti (Reinhart D. R. et al., 1997).

Il metano, oltre a dare un elevato contributo all'effetto serra, se raggiunge concentrazione del 5-15% reagendo con l'aria crea delle miscele esplosive (Damiani A. et al.,1992).

Per quanto concerne i componenti in tracce presenti nel biogas da discarica, bisogna precisare che delle molte sostanze omogenee contenute nei rifiuti urbani solo poche si trovano come composti in traccia nel biogas dopo che tali rifiuti sono stati smaltiti in discarica. Perché questo avvenga devono essere soddisfatte le seguenti condizioni fisiche e chimico-fisiche:

Gas	Formula	Densità (Kg/m <sup>3</sup> )	PCI (KJ/m <sup>3</sup> )	Tc (°C)	Te (°C)	Ea (mJ)	Solubilità H <sub>2</sub> O (g/l)	Caratteristiche
metano	CH <sub>4</sub>	0,717	35000	-82,5	-161,5	0,6-0,7	0,0645	inodore, incolore, non tossico
anidride carbonica	CO <sub>2</sub>	1977	-	31,1	-78,5	-	16880	inodore, incolore, non tossico a basse concentrazioni
ossigeno	O <sub>2</sub>	1429	-	-118,8	-183	-	0,0430	inodore, incolore, non tossico
azoto	N <sub>2</sub>	1248	-	-147,1	-195,8	-	0,0190	inodore, incolore, non tossico, non infiammabile
monossido di carbonio	CO	1247	12640	-139	-191,5	-	0,0280	inodore, incolore, tossico, infiammabile
idrogeno	H <sub>2</sub>	0,090	10760	-239,9	-252,5	0,05	0,0020	inodore, incolore, non tossico, infiammabile
idrogeno solforato	H <sub>2</sub> S	1539	-	100,4	-60,7	-	38460	incolore, tossico
aria		1290	-	-		-	-	inodore, incolore, non tossico, non infiammabile
PCI: potere calorifico inferiore; Tc: temperatura critica; Te: temperatura di ebollizione a temperatura atmosferica; Ea: energia di accensione.								

Tabella 1.4: Proprietà delle componenti principali del biogas da discarica (Damiani A. et al.,1992).

- ❖ le sostanze devono essere scarsamente solubili in acqua (molecole *poco polari*) ed avere alti *coefficienti di ripartizione ottanolo-acqua*<sup>2</sup> (lipofile) oppure alto fattore di bioaccumulazione. Le sostanze facilmente solubili vengono infatti emesse con il percolato;
- ❖ è inoltre necessario che la sostanza possieda una notevole pressione di vapore e una bassa temperatura di evaporazione;
- ❖ le sostanze emesse in traccia nel biogas devono essere difficilmente adsorbibili sulla superficie dei solidi. Le sostanze non polari con alte temperature di ebollizione vengono adsorbite sulla superficie della frazione organica dei rifiuti e delle particelle del terreno, venendo così sottratte al biogas.

Inoltre, a seconda della fase microbiologica in cui viene a trovarsi la produzione del biogas in una determinata discarica e ad un dato momento, si possono aggiungere due nuove condizioni:

- ❖ in corrispondenza dei bassi valori di pH le sostanze non devono trovarsi allo stato ionico. Per questo motivo ammoniaca e ammine in genere vengono riscontrate in concentrazioni molto basse nel biogas quando il pH del percolato è acido;
- ❖ le sostanze devono essere lentamente biodegradabili.

Elencare tutti i composti presenti in traccia nel biogas è impossibile, perché la composizione del gas generato in discarica è diversa, a seconda delle differenze esistenti tra i rifiuti urbani in essa scaricati o dal fatto che insieme ad essi sono stati smaltiti anche rifiuti di diversa natura, oppure del tipo di ambiente in cui la discarica è stata costruita ecc.

In sintesi tra i più comuni componenti in traccia riscontrati nel biogas da discarica sono da citare gli alcoli, eteri, esteri ed acidi grassi, aldeidi e chetoni, composti solforati, idrocarburi aromatici, idrocarburi alifatici e ciclici, terpeni ed infine idrocarburi alogenati (Laugwitz R. Et al., 1989).

---

### 1.3.2 INFLUENZA DELLE CONDIZIONI CLIMATICHE SULLE EMISSIONI DI BIOGAS

---

Gli eventi meteorologici hanno una grande influenza sugli effetti delle normali attività gestionali della discarica in quanto da essi dipendono i quantitativi del percolato e del biogas prodotti, le direzioni di dispersione del biogas ecc.

I parametri meteo climatici devono essere costantemente tenuti sotto controllo, per cui se non dovesse esistere nei pressi dell'impianto di smaltimento una stazione per le misure di tali parametri si deve provvedere all'installazione all'interno della discarica.

---

<sup>2</sup> La costante di ripartizione ottanolo – acqua,  $K_{ow}$ , esprime la ripartizione fra solvente organico ed acqua. L'importanza di questo parametro risiede principalmente nello stretto legame fra  $K_{ow}$  e la ripartizione del composto organico fra acqua, i solidi naturali (suolo, sedimenti, particolato sospeso) ed il biota vivente, o meglio, fra l'acqua e la frazione organica presente. Il coefficiente ottanolo – acqua indica la tendenza di un composto a solubilizzarsi in sostanze idrofobiche apolari, piuttosto che in acqua, liquido polare, ed è pertanto una misura della sua tendenza a bioaccumularsi. Tale coefficiente è espresso nel seguente modo:

$$K_{ow} = \frac{\mu g_{cont.} / ml_{ottanolo}}{\mu g_{cont.} / ml_{acqua}}$$

dove  $\mu g_{cont.}/ml_{ottanolo}$  è la concentrazione del contaminante solubilizzato nell'ottanolo e  $\mu g_{cont.}/ml_{acqua}$  è quella del contaminante solubilizzato in acqua.

### 1.3.2.1 PRINCIPALI FATTORI METEOCLIMATICI

Le leggi fisiche che stanno alla base del trasporto di materia mostrano chiaramente che le variazioni di pressione atmosferica, temperatura del suolo e dell'aria, velocità del vento e umidità del suolo possono determinare importanti variazioni di flusso.

Il biogas tende a muoversi dalle aree ad alta pressione (posizionate in prossimità della sua sorgente di alimentazione) verso aree a minore pressione esterne alla discarica, in un movimento che varia in funzione degli ostacoli e/o delle vie preferenziali che esso incontra sul percorso.

Questo movimento, però, non è costante né nella portata né nella direzione ma è strettamente legato alle fluttuazioni della pressione barometrica: così quando la pressione atmosferica diminuisce, il gas è forzato a uscire dalla discarica e a espandersi nei terreni circostanti, mentre quando la pressione atmosferica aumenta, il gas tende a restare imprigionato nella discarica fino a un nuovo cambiamento di pressione:

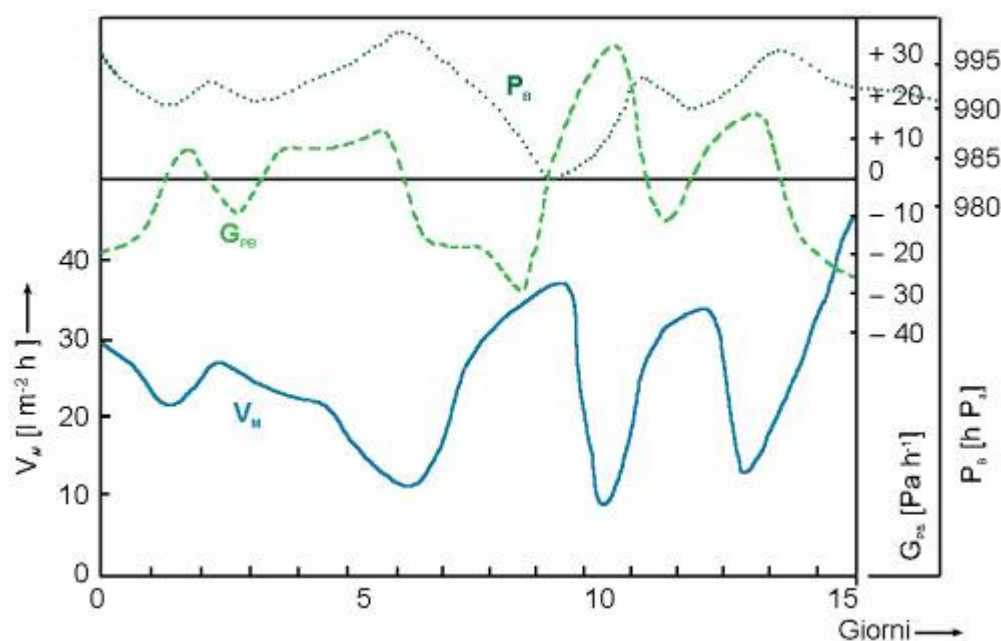


Figura 1.3: Confronto tra i valori del tasso di migrazione del metano, della pressione barometrica e del gradiente della pressione barometrica (Staka F., 1997, modificata)

Nella Figura 1.3 con  $P_B[hPa]$  è indicata la pressione barometrica,  $G_{PB}[dP_B/dt]$  il gradiente della pressione barometrica e con  $V_M[l \cdot m^{-2} \cdot h]$  il tasso di migrazione del metano.

Tale comportamento si è rivelato un fattore significativo nell'analisi degli eventi esplosivi innescati dalla presenza di biogas in quanto una veloce caduta di pressione atmosferica può provocare una rapida crescita dei livelli di metano nell'area circostante la discarica. Il movimento, nella pratica, risponde alle seguenti leggi:

- ❖ in presenza di pressione atmosferica stabile, il tasso di biogas emesso è costante e indipendentemente dalla pressione;



- ❖ quando la pressione atmosferica aumenta, il tasso di biogas emesso decresce in proporzione all'aumento di pressione;
- ❖ quando la pressione atmosferica diminuisce, il tasso di biogas emesso aumenta in proporzione alla diminuzione della pressione

Un'ulteriore conferma della proporzionalità tra la portata del biogas e il gradiente della pressione barometrica è stata dimostrata da Young nel 1990, mettendo a confronto le variazioni di pressione atmosferica al suolo e i relativi tassi di emissione di biogas in una discarica nell'area nella quale si erano verificate tre “basse” barometriche in un periodo comprensivo di 200 ore.

$$Flusso_{gas} = \alpha + \beta \left( \frac{dP_{atm}}{dt} \right) \quad (1.7)$$

quindi la portata del gas uscente dipende dalla pressione atmosferica  $P_{atm}$ , da  $\alpha$  che è il tasso totale di gas generato all'interno del sito e da  $\beta$  costante dipendente dai parametri fisici della discarica.

La pioggia è un altro elemento ambientale che determina cambiamenti sul flusso emesso: penetrando attraverso il terreno di copertura crea dei “fiumi” sotterranei che con l'acqua satura i pori del terreno riducendo considerevolmente la permeabilità al gas e di conseguenza la quantità di biogas emesso (Christophersen M., et al., 2001).

Un altro fattore che modifica la *permeabilità/porosità del terreno* è l'umidità del suolo, per cui è ragionevole attendersi variazioni di flusso indotte non solo dalle precipitazioni che producono comunque un certo carico idraulico, ma anche da variazioni di temperatura e/o umidità atmosferica che provocano processi di condensazione/evaporazione. Sperimentalmente si è constatato che in terreni asciutti l'emissione di biogas è consistente, mentre in quelli molto umidi l'emissione è minima, esiste quindi una relazione inversa tra umidità del suolo e emissione di biogas da discarica (Christophersen M., et al., 2001; Héroux M. Et al., 2005).

Per quanto riguarda la *temperatura del suolo* si può affermare che in molti casi di studio nei siti caratterizzati da temperature superficiali elevate sono state associate fughe di gas rilevanti. Tuttavia bisogna precisare che non esiste una relazione biunivoca tra i due eventi in quanto l'aumento della temperatura del suolo può dal calore trasportato dal gas, dai processi esotermici di ossidazione del metano oltre che dalla degradazione anaerobica che ha luogo all'interno dell'impianto di smaltimento dei rifiuti (Yamada M., et al., 2005).

Infine il vento è un altro parametro ambientale agisce sulle emissioni inducendo il trasporto del gas e con la sua velocità può influenzare le misure di flusso per effetto venturi. La turbolenza del vento introduce delle fluttuazioni di pressione con le conseguenze descritte precedentemente che ciò comporta in termini di emissione di biogas. Misure giornaliere delle emissioni di biogas hanno evidenziato come una caduta della pressione barometrica può cambiare drasticamente il valore del flusso di biogas emesso in un intervallo di tempo estremamente piccolo (Poulsen T.G., 2005).

Vista l'importanza che i cambiamenti dei sistemi climatici hanno sull'entità del biogas emesso dal corpo di una discarica è facilmente intuibile che le emissioni di biogas siano soggette a forti variazioni stagionali.

In Danimarca alcuni esperimenti della durata di un anno (dall'Aprile del 1997 allo stesso mese dell'anno successivo) condotti da Christophersen e Kjeldsen et al. (2001) in più discariche hanno mostrato che il flusso di biogas emesso è maggiore in estate e ciò dovuto alla maggiore stabilità delle condizioni climatiche che creano tutti i presupposti

Volendo fare delle distinzioni tra i due principali componenti del biogas, i risultati degli stessi studiosi hanno sottolineato che le emissioni di metano sono maggiori nei periodi invernali, tra Novembre e Aprile, mentre i picchi dell'anidride carbonica sono stati invece registrati in estate. La spiegazione di tale fenomeno è da ricercare principalmente nel processo di ossidazione del metano in biossido di carbonio che avviene nel terreno di copertura della discarica. L'ossidazione del metano è un processo biologico fortemente dipendente dalla temperatura, esperimenti riprodotti in laboratorio hanno dimostrato come il rateo di ossidazione ottimale è stato ottenuto per temperature comprese tra 25 e 35°C valori che sono raggiungibili nella stagione estiva (Christophersen M., et al., 2001; Héroux M. Et al., 2005).

---

### 1.3.3 ATTENUAZIONE NATURALE DEL FLUSSO DI BIOGAS NELLA COPERTURA SUPERFICIALE DELLE DISCARICHE

---

Negli studi condotti da Bigner et al. [1997] su è evidenziato, nei terreni di copertura, la presenza contemporanea di almeno due gruppi di batteri metanotrofici. Il primo preferisce basse concentrazioni di metano e alte concentrazioni di ossigeno ed è continuamente attivo in terreni di copertura poco profondi. L'ossidazione è in questo caso limitata dalla disponibilità di metano. Il secondo gruppo predilige invece alte concentrazioni di metano e basse concentrazioni di ossigeno (Cossu et al., 2005).

Le limitazioni fisiche del processo di ossidazione sono legate alla disponibilità di ossigeno, mentre dal punto di vista biologico vi sono vari parametri che influenzano l'attività batterica, tra cui la temperatura, l'umidità, il contenuto di carbonio organico (un rapporto C/N basso riduce la capacità ossidativa), la disponibilità di nutrienti e la competizione con altri batteri.

L'umidità gioca un ruolo fondamentale nei processi di degradazione biochimica: è, infatti il mezzo di trasporto per la materia organica e per i nutrienti e influenza direttamente l'aerazione del terreno. Il contenuto ottimale dell'umidità nei terreni di copertura della discarica varia in base alla granulometria ma indicativamente si può prendere come ordine di grandezza il 15% (Gebert et al., 2009).

Nel caso si utilizzi compost come copertura, esso garantisce un'attività microbica elevata per un largo campo di valori dell'umidità (40-80 %) poichè, a causa della sua stessa struttura, l'ossigeno risulta sempre disponibile per i batteri.

Per quanto riguarda la temperatura, la più marcata dipendenza dalla temperatura si ha sullo strato superficiale dei terreni, dove si verifica la maggiore aerazione (con una temperatura

sotto i 10 °C gradi l'ossidazione si con sidera assente). I massimi valori di ossidazione si hanno a temperature comprese fra i 26 e i 36 °C.

Negli ultimi anni si è anche studiato in funzione della pressione la composizione superficiale del biogas ottenendo interessanti risultati (Gebert et al., 2006) come si osserva in figura. Semplificando il concetto: qualora la pressione atmosferica sia tale da permettere all'aria di entrare nel terreno superficiale diminuiscono le emissioni di CH<sub>4</sub>.

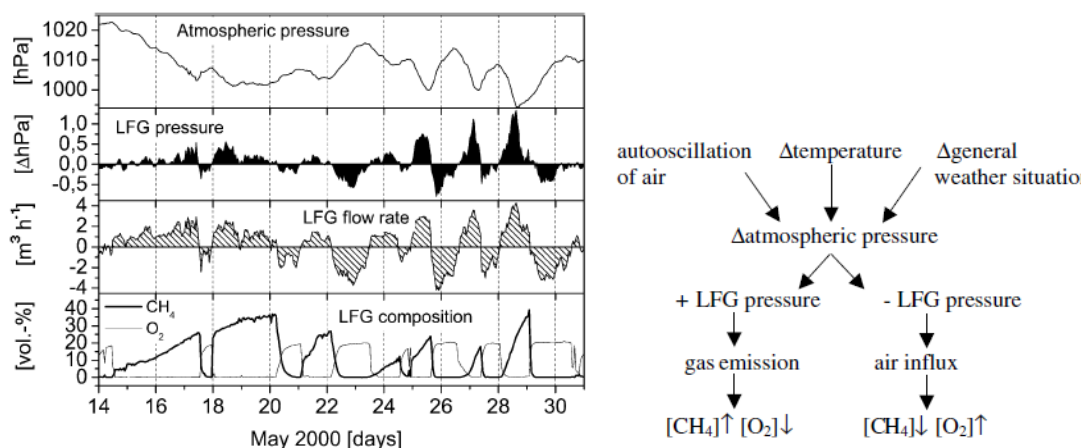


Figura 1.4: Dipendenza del contenuto di CH<sub>4</sub> nel gas interstiziale di copertura con la pressione ambientale (Gebert et al., 2006).

Data la forte dipendenza del fattore di emissioni in funzione del terreno e delle condizioni climatiche è molto difficile stimare il rapporto superficiale CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> del biogas (Rachor et al. 2009) (vedi figura 1.6).

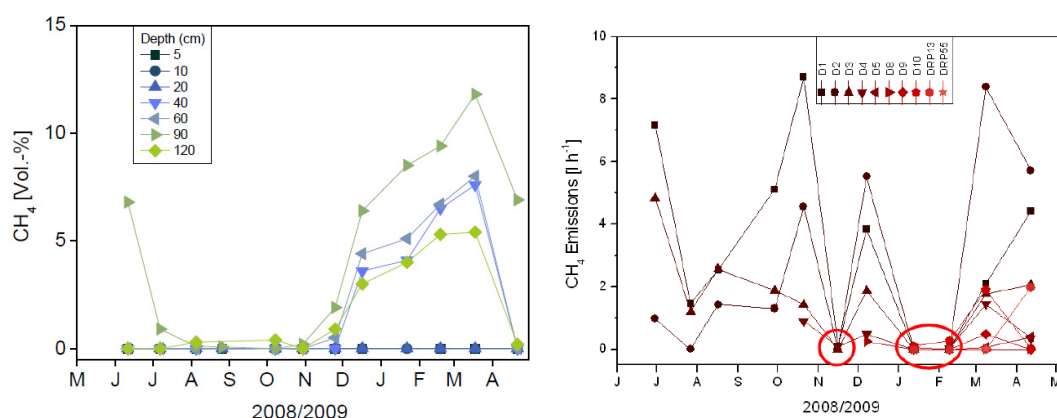
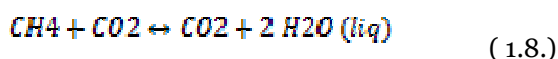


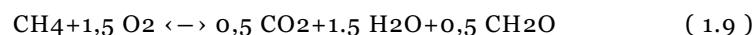
Figura 1.5: Variazione stagionali delle concentrazioni di CH<sub>4</sub> in copertura, a sinistra gli andamenti a differenti profondità a destra le concentrazioni negli *hot spot*.

### 1.3.3.1 PROCESSI DI TRASFORMAZIONE DEL METANO IN CO<sub>2</sub> NELLA COPERTURA

Il primo stadio dell'ossidazione del metano è la sua ossidazione in metanolo attraverso l'enzima MMO ("Metano-mono-exigenasi"), le fasi successive riguardano la trasformazione di metanolo a formilaldeide, da questa ad acido formico ed in fine a CO<sub>2</sub>. La reazione complessiva è quindi scritta :



In realtà non tutto il metano a contatto con l'aria si trasforma in CO<sub>2</sub> secondo alcuni autori, una parte non trascurabile del CH<sub>4</sub> si trasforma in biomassa in accordo alla seguente (De Visscher et al. 2003):



dove CH<sub>2</sub>O rappresenta graficamente la biomassa formata. Si noti che in questo caso da una mole di metano si forma mezza mole di CO<sub>2</sub> (Raco et al. 2006).

Le misure dirette dei rapporti CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> medi superficiali oscillano fra 0,9- 0,7 da una consultazione della letteratura scientifica (Raco et al., 2006, Capaccioni et al., 2005).

Il rapporto medio CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> è fortemente dipendente dalla presenza di *hot spot* in prossimità dei quali il rapporto è paragonabile al rapporto profondo (ovvero interno alla discarica), mentre in emissioni contenute il rapporto CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> è inferiore a 1 e le concentrazioni superficiali di entrambi tendono a zero, come mostrato dalle risultanze dello studio degli autori Rachor, Streese-Kleeberg and Gebert (2009).

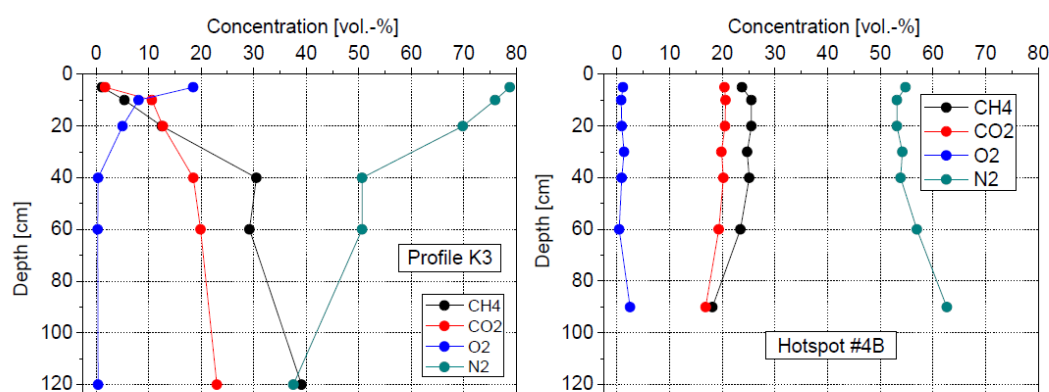


Figura 1.6: Risultanze dello studio degli autori Rachor, Streese-Kleeberg and Gebert (2009)

### 1.3.4 RECUPERO ENERGETICO DA RIFIUTI

Sia il problema rifiuti che il problema recupero di energia da rifiuti sono questioni tipiche delle società industriali "ricche". Lo stretto legame fra produzione di rifiuti e prodotto interno lordo è riscontrabile in tutti i paesi industrializzati. In Italia nel 2005 si stimava una produzione di 31,7 milioni di tonnellate di rifiuti solidi urbani, corrispondente a 539 kg per abitante per anno (APAT 2006).

La possibilità di generare energia in forma utile (calore o elettricità) dai rifiuti deriva dalla presenza negli stessi di materiale combustibile che, attraverso un processo di ossidazione, può liberare energia. Per caratterizzare un rifiuto energeticamente si usa esprimere il potere calorifico facendo riferimento ad una combustione isobara con reagenti e prodotti a 25 °C. In particolare si definisce *Potere Calorifico Inferiore (PCI)*, il calore liberato dalla combustione

isobara a 1 atm, 25 °C nel caso in cui tutta l'acqua generata dalla combustione è allo stato liquido.

Da un punto di vista energetico è conveniente pensare il rifiuto come composizione di tre parti: l'umidità, le cenere e i solidi volatili (Consonni et al., 2009).

#### 1.3.4.1 OPZIONI PER IL RECUPERO DI ENERGIA

---

Le caratteristiche fisico-chimiche dei RSU richiedono dispositivi e processi di conversione ad hoc. Da un punto di vista concettuale il recupero di energia può seguire due filosofie:

1. la combustione diretta, con trasferimento dell'energia termica liberata attraverso i tubi di un generatore di vapore. Il materiale combustibile può essere RSU oppure "Refuse Derived Fuel" (RDF o CDR), con potere calorifico elevato;
2. Conversione in un combustibile intermedio liquido o gassoso per esempio mediante pirolisi o gassificazione. Dopo una depurazione il combustibile intermedio può essere impiegato in normali caldaie o motori a combustione interna (Consonni et al., 2009).

*Appartiene concettualmente a quest'ultima categoria la produzione del biogas da discarica.*

Il diagramma a destra in figura 1.8 è basato su valori tipici attuali di discariche italiane: la produzione di biogas 0.20-0.25 m<sup>3</sup> per kg di RSU, biogas composto per il 50% da gas inerti; il potere calorifico inferiore del biogas 4000-4500 kcal/m<sup>3</sup> la frazione di biogas recuperabile (efficienza di aspirazione) 60% biogas prodotto, utilizzo del biogas in motori con un rendimento del 33-38%.

E' conseguente deduzione che aumentare e ottimizzare il recupero energetico delle discariche a parità di flussi di rifiuto, implichi **l'aumento del coefficiente di aspirazione** (tramite una corretta gestione del sistema di aspirazione) e l'aumento del PCI del biogas (ovvero l'ottimizzazione del processo di metanazione).

### 1.4 FENOMENI FISICI DI TRASPORTO DEI GAS NEI MEZZI NATURALI POROSI.

---

La conoscenza dei processi fisici che controllano il trasporto del gas attraverso un mezzo poroso è di cruciale importanza per la comprensione di metodi che hanno l'obiettivo di indagare i flussi di gas dal suolo. Le misure delle emissioni di gas dal suolo in atmosfera hanno coinvolto diverse branche della scienza spaziando dall'agronomia all'ecologia, dalla geochimica alla vulcanologia.

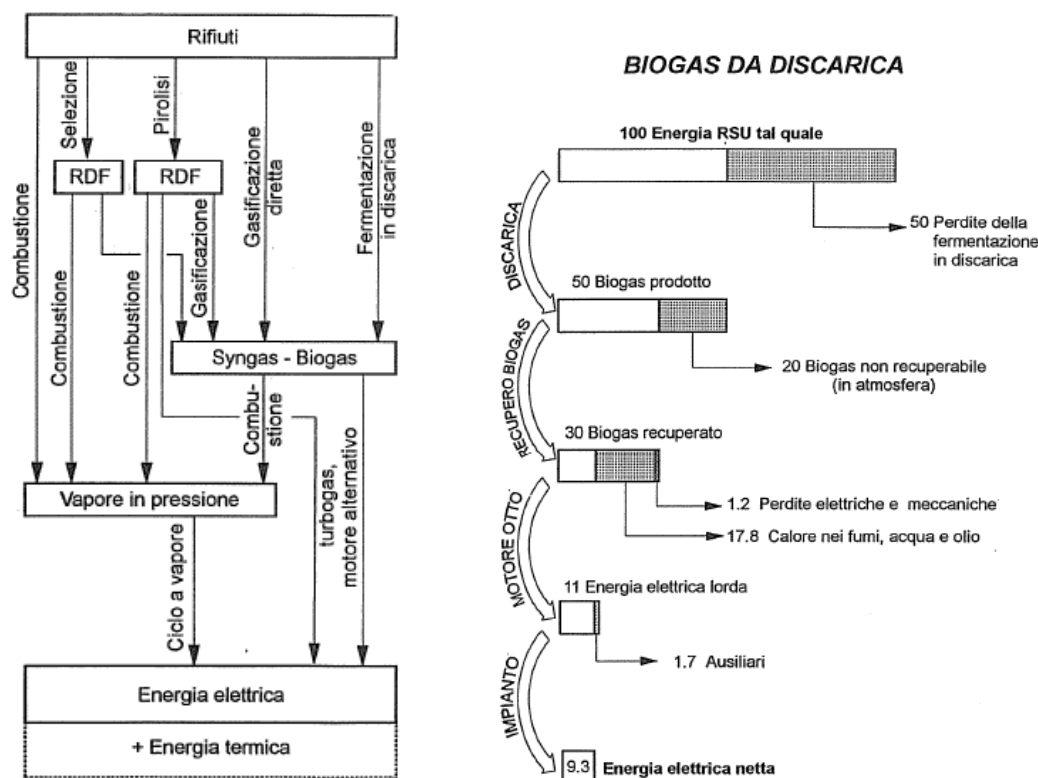


Figura 1.7: Rappresentazione schematica dei processi di recupero di energia (de Fraja Frangipane et al. 1995)

Per questo motivo i metodi di indagine sono con il tempo aumentati, diversificati e progressivamente migliorati grazie al contributo di gruppi di ricercatori che continuamente indagano in questi settori. Una delle specie gassose più investigate è l'anidride carbonica; per la misura delle emissioni si è passati da alcuni metodi indiretti basati sull'assorbimento della  $\text{CO}_2$  in una soluzione caustica (*"alkali adsorption method"*, Witkamp, 1996; Kirita, 1971, Anderson, 1973), ampiamente usati in passato, a quelli più attuali e diretti quali il **metodo dinamico** proposto da Gurrieri e Valenza (1988) per misurare gli efflussi di  $\text{CO}_2$  dal suolo in aree vulcaniche e il **metodo della camera di accumulo** (Tonani, Miele 1991).

Il primo è funzione del contenuto di  $\text{CO}_2$  in una miscela costituita da aria e gas provenienti dal suolo (*"dynamic concentration"*,  $C_d$ ) campionata usando una speciale sonda inserita nel terreno ad una profondità di 50 cm. Come dedotto da Gurrieri e Valenza, la concentrazione dinamica di  $\text{CO}_2$  è proporzionale al flusso di  $\text{CO}_2$  mediante una relazione empirica ricavata in laboratorio in funzione degli intervalli di flusso ben precisi e di una permeabilità del suolo nota.

Il secondo è basato sulla relazione teorica tra il tasso di crescita della concentrazione di  $\text{CO}_2$  all'interno del contenitore capovolto (camera di accumulo) e adagiato sulla superficie del suolo.

In questo capitolo è presente una prima parte in cui sono descritte e discusse brevemente le equazioni fondamentali che governano il moto di un fluido in un mezzo poroso ed una seconda parte in cui vengono analizzati i metodi di misura che sono stati usati in sede

sperimentale: il metodo dinamico per valutare il flusso di metano dal suolo e la camera di accumulo per il flusso del biossido di carbonio.

Il trasporto di un gas attraverso un mezzo poroso è funzione di due distinti processi: **diffusione** e **advezione**. La diffusione molecolare è quel processo per il quale la materia fluisce da una regione di alta concentrazione verso una a bassa concentrazione, come risultato di un movimento casuale delle molecole. L'advezione (o "convezione", o trasporto di massa, o "flusso viscoso" come viene chiamato da diversi autori) è quel meccanismo per cui la materia si muove in risposta al gradiente di pressione. Normalmente, in un contesto naturale come è un terreno, il movimento di un gas al suo interno è da attribuire alla combinazione di questi due diversi meccanismi (Tonani F., Miele G. 1991).

---

#### 1.4.1 DIFFUSIONE

---

I processi di diffusione di un gas sono regolati dalla prima *legge di Fick*, che evidenzia la relazione esistente tra il flusso diffusivo attraverso la superficie unitaria,  $J_d$  ( $M^*L^{-2}*T^{-1}$ ), e il gradiente di concentrazione  $\nabla C$  ( $M^*L^{-4}$ ):

$$J_d = -D_m \nabla C \quad (1.10)$$

in cui  $D_m$  è il coefficiente di diffusione molecolare ( $L^2*T^{-1}$ ) che indica la mobilità di una specie gassosa nel fluido, che può contenere anche altre specie gassose. Il volume in cui il fluido può diffondere dipende dalla porosità del mezzo; bisogna considerare tuttavia che il percorso reale del gas non è lineare ma tortuoso. Per tener conto di questa caratteristica, il coefficiente di diffusione molecolare  $D_m$  nella prima legge di Fick deve essere sostituito con il "*bulk diffusion coefficient*"  $D$ , che è espresso dalla seguente relazione:

$$D = \frac{D_m \cdot n}{\tau} \quad (1.11)$$

in cui  $n$  è "*air-filled porosity*" è un indice del volume effettivamente disponibile per la diffusione e  $\tau$  è il fattore di tortuosità. Questo ultimo può essere pensato come la distanza media che una molecola di gas deve percorrere attraverso la complessa rete dei pori per spostarsi di una unità di distanza in un mezzo poroso (Kutilek, M., Nielsen, D.R., 1994); esso è spesso maggiore di 1 in quanto l'intricato percorso è quasi sempre più grande del cammino lineare. Per un mezzo poroso e umido, come il suolo, il rapporto  $n/\tau$  può essere scritto come:

$$\frac{n}{\tau} = n^{2a} \left( \frac{n}{n_t} \right)^2 \quad (1.12)$$

con  $n_t$  è rappresentata la porosità del mezzo e  $a$  è un coefficiente empirico determinato mediante la relazione sottostante:

$$n^{2a} + (1 - n)^a = 1 \quad (1.13)$$

---

### 1.4.2 ADVEZIONE

---

Il trasporto advettivo di un gas in un mezzo poroso segue la legge di Darcy che mette in luce il legame esistente tra il tasso di trasferimento di un gas per unità di area di sezione,  $v$  ( $L^3 T^{-1}$ ) e il gradiente di pressione,  $\nabla P$  ( $M L^{-2} T^{-2}$ ):

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (1.14)$$

dove  $\mu$  ( $M L^{-1} T^{-1}$ ) è la viscosità del gas e  $k$  ( $L^2$ ) è la permeabilità intrinseca del suolo ossia la capacità del suolo di essere attraversato da un fluido, essa è influenzata dalle proprietà fisiche del suolo così come da “*air-filled porosity*” e dalla tortuosità. Kozeny e Carman hanno proposto la seguente equazione che consente di tener conto dei suddetti fattori (Bear, 1972):

$$k = \frac{c_0 n^3 \tau}{s^2} \quad (1.15)$$

nella quale  $c_0$  è il fattore di forma dei pori, che è stato largamente usato per relazionare la permeabilità con la morfologia del solido, e  $s$  è l'area superficiale del solido per unità di volume del campione (Camarda M., 2002).

---

### 1.4.3 MECCANISMO COMPLESSIVO DI TRASPORTO DI UN GAS NEL SUOLO

---

Quando coesistono il gradiente di pressione e di concentrazione il trasporto di un gas è dovuto simultaneamente ai due processi per cui il flusso  $J_i$  di una generica specie gassosa è esprimibile come la somma del contributo diffusivo e di quello advettivo (Popov et al., 1999):

$$J_i = J_{d,i} + J_{ad,i} = -D \nabla C_i + C_i v \quad (1.16)$$

in cui  $C_i$  ( $M L^{-3}$ ),  $\nabla C_i$  ( $M L^{-4}$ ) e  $J_{d,i}$  ( $M L^{-2} T^{-1}$ ) sono rispettivamente la concentrazione, il gradiente e il flusso diffusivo della specie gassosa considerata, mentre  $J_{ad,i}$  ( $M L^{-2} T^{-1}$ ) è il flusso advettivo. Dalla (1.14) se ne deduce che il flusso di un generico gas in un mezzo poroso naturale è funzione della concentrazione del gas, del rateo advettivo del gas  $v$ , oltre che dalle proprietà del suolo e del gas. Nell'equazione (1.14) la somma del flusso diffusivo e advettivo è costante ad ogni profondità; i dati sperimentali hanno mostrato che quando il gradiente di concentrazione è più alto in prossimità della superficie rispetto alla sorgente del gas prevale il moto diffusivo rispetto a quello advettivo (Camarda M., 2002; Tonani F., Miele G. 1991).



## 1.5 METODI DI MISURA PER LE EMISSIONI DI GAS DI DISCARICA

---

Il trasporto di un gas nel sottosuolo è influenzato sia dalla concentrazione che dal gradiente di pressione mediante diffusione e convezione. Generalmente uno dei due processi risulta dominante sull'altro: la diffusione di norma prevale vicino alla superficie del suolo, mentre la convezione si manifesta principalmente vicino ai pozzi di raccolta del gas, i quali sono soggetti ad un vuoto parziale per poter estrarre il gas dalla discarica (Bogner J., Spokas K. 1993).

Una volta che il gas passa in atmosfera, il moto è prevalentemente di tipo convettivo ed è fortemente soggetto ai processi turbolenti atmosferici.

La ricerca non ha prodotto un metodo unico e perfetto per quantificare esattamente le emissioni nette di biogas da discarica, tuttavia è possibile fare una scelta tra diverse tecniche che sono state sperimentate nel campo in diverse condizioni. Alcune tecniche sono state impiegate per stimare le emissioni da piccole aree ben definite fornendo delle emissioni puntuali di biogas, mentre altre danno una stima globale dei flussi per aree di indagini ampie, per esempio un'intera discarica. La tecnica della camera di accumulo e le misure del gradiente appartengono al primo gruppo, mentre i metodi micrometeorologici, tecnica tracciante, spettroscopia FTIR e ancora telerilevamento appartengono al secondo gruppo (Fischer C. et al., 1999).

*In questa sezione del capitolo verranno commentate le caratteristiche dei metodi più importanti per la misura del flusso di gas dal suolo che possono essere ulteriormente suddivisi in due categorie:*

- **Diretti;**
- **Indiretti.**

---

### 1.5.1 METODI DIRETTI.

---

Questi metodi sono stati messi a punto per misurare i flussi di CO<sub>2</sub> dal suolo nelle aree di interesse geologico e vulcanico e per valutare in campo agronomico il tasso di respirazione del suolo (Carapezza et al 2004). L'adattamento applicativo nel settore dello smaltimento dei rifiuti è stata documentata dalla letteratura tecnico-scientifica. Si tratta di metodi che si avvalgono dell'uso di apparecchiature che vengono messe direttamente a contatto con il suolo nel punto di indagine scelto. Tali tecniche comprendono:

- ***misure del gradiente di concentrazione***
- ***tecniche attive***
- ***tecniche passive***

### 1.5.1.1 MISURE DEL GRADIENTE DI CONCENTRAZIONE.

Questo metodo è descritto da Rolston (1986), è una tecnica eseguita su campioni di piccolo volume, aspirati attraverso sonde inserite nel terreno a profondità variabile. I valori di flusso vengono poi calcolati attraverso la legge di Fick, assegnando un valore al coefficiente di diffusione del gas per ogni sito di misura:

$$F = -D_s \left( \frac{dc}{dx} \right) \quad (1.17)$$

l'equazione esprime la variazione del flusso ( $F$  [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]) nello spazio ( $x$  [m]) di un composto al variare della sua concentrazione ( $c$  [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]) a tempo costante e viene indicato con  $D_s$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] il coefficiente di diffusione che descrive quanto il mezzo è permeabile al composto.

Questo metodo è utilizzato per misurare flussi di VOC dal suolo, conosciuto anche con il nome di *Soil Gas Survey*. La difficoltà maggiore che si incontra nella applicazione è proprio quella di assegnare un valore al coefficiente di diffusione in ogni sito di misura. Tale coefficiente infatti può presentare una grande variabilità spaziale, essendo fortemente influenzato dalle caratteristiche del suolo (porosità, permeabilità ecc.). Il valore misurato è corretto solo se il meccanismo è solo diffusivo, fatto che quasi mai si verifica (Bogner, 1997). Infatti poiché la componente advettiva del flusso è rilevante, date le alte pressioni raggiunte dai gas, è preferibile utilizzare misure dirette di flusso.

Inoltre, questo metodo fornisce solo dei valori puntuali e i valori dei flussi potrebbero essere influenzati dalle variazioni che sono presenti nel terreno di copertura e dalla presenza di fessure nel terreno. Confrontando i valori ottenuti con questa tecnica con il più comune metodo della camera di accumulo si può constatare che spesso risultano leggermente più alti e ciò potrebbe essere causato dall'intrusione di aria nello strato superiore del terreno al momento del campionamento del gas. I flussi risultano sovrastimati se il gas analizzato è sottoposto a parziale ossidazione nel passaggio attraverso il terreno come nel caso del metano (Fischer C., et al. 1999).

### 1.5.1.2 TECNICHE ATTIVE.

Vengono anche definite **dinamiche**. Il metodo di misura è basato sulla determinazione della concentrazione dinamica della specie da analizzare ("*dynamic concentration method*", *DCM*), ed è stato proposto da Guerrieri e Valenza (1988) per la misura del flusso di  $\text{CO}_2$  in ambiente vulcanico. Uno schema semplificato del metodo è mostrato in Figura 1.8. Esso consiste in una sonda speciale collegata ad spettrofotometro IR (accuratezza entro  $\pm 5\%$ ) che viene inserita nel suolo fino ad una profondità di 0,5 m.

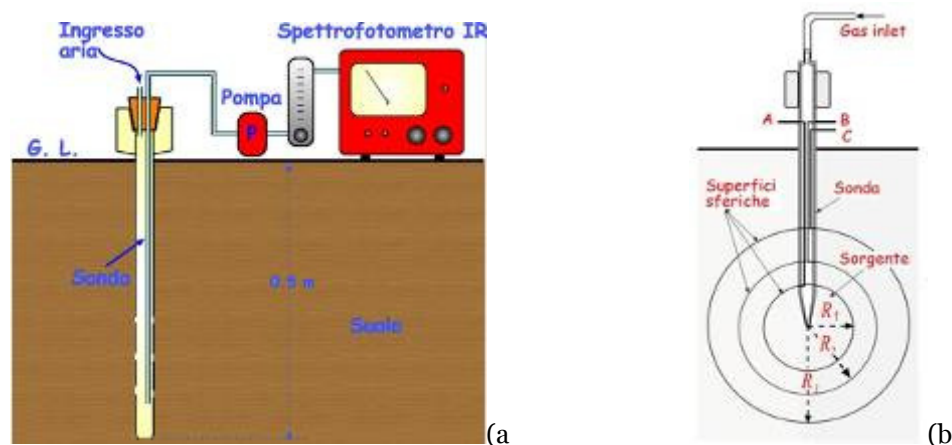


Figura 1.8 (a): Schema del sistema per la misura del flusso di CO<sub>2</sub>. I principali componenti sono uno spettro-fotometro ad IR, una pompa a flusso costante ed una speciale sonda di misura. (b): Schema della sonda usata per la misura della permeabilità *in situ*.

Si tratta di una sonda di Cu contenuta all'interno di un tubo di acciaio della lunghezza di 50 cm e del diametro di 1,3 cm, perforato negli ultimi 15-20 cm del suo tratto terminale. Tale tubo viene piantato nel terreno ad una profondità di 50 cm e la sonda viene protetta mediante una guarnizione di gomma. Il gas del suolo è connesso con l'atmosfera attraverso un tubicino inserito nella chiusura del dispositivo indicato come ingresso aria in Figura 1.8b. la sonda è connessa attraverso una pompa ad uno spettrofotometro all'infrarosso settato sulla lunghezza d'onda della CO<sub>2</sub>. Dopo pochi minuti di pompaggio a flusso costante, la concentrazione di CO<sub>2</sub> nella miscela di gas (aria più gas nel suolo) raggiunge un valore costante. È stato sperimentalmente trovato che i valori di concentrazione di CO<sub>2</sub> misurati con questo metodo (detti "dinamici" da Guerrieri e Valenza per distinguere tali valori da quelli "statici" ricavati per il calcolo del gradiente di concentrazione) sono direttamente proporzionali al flusso di CO<sub>2</sub> nel suolo secondo la relazione

$$\varphi = M \cdot C_d \quad (1.18)$$

dove  $\varphi$  è il flusso di CO<sub>2</sub> attraverso il suolo (espresso in cm/s);  $C_d$  è la "concentrazione dinamica" della CO<sub>2</sub> (espressa in ppm vol);  $M$  è una costante empirica che dipende dalla geometria del sistema di campionamento utilizzato, dal flusso della pompa dello strumento, dalla profondità di inserimento della sonda nel suolo e dalla permeabilità del suolo. I provini di suolo usati in laboratorio erano caratterizzati da un valore di permeabilità di circa 30 Darcy<sup>3</sup>. Pertanto maggiore era la differenza tra questo valore di permeabilità e la permeabilità reale del suolo, maggiore è l'errore nel calcolo del flusso di CO<sub>2</sub> diffuso (Camarda et al., 2004).. Recentemente diversi tests sul metodo dinamico sono stati eseguiti per valutare l'influenza della permeabilità dei suoli sulle misure di flusso di CO<sub>2</sub> dai suoli effettuate con questo metodo. In questo nuovo esperimento sono stati utilizzati quattro suoli caratterizzati da differenti valori di permeabilità ( $3,6 \times 10^{-2}$  –  $1,25 \times 10^2$  darcys) ed inoltre sono state ripetute misure di flusso facendo variare il flusso della pompa del sistema, da 4 a 0,4 l min<sup>-1</sup>. I risultati

<sup>3</sup> Si ricorda che questo metodo è stato messo a punto per lo studio delle emissioni gassose da suoli di tipo vulcanico e solo successivamente è stato applicato al caso delle emissioni di biogas da discariche; ne consegue che i valori permeabilità dei suoli usati durante i test sono quelli tipici delle aree vulcaniche.

di laboratorio mostrano che quando le misure di flusso sono effettuate ad un basso valore del flusso d'aspirazione (ad esempio a  $0,8 \text{ l min}^{-1}$ ) l'errore medio dovuto alla permeabilità del suolo è inferiore al 5%. La permeabilità è uno dei principali parametri che influenza il flusso dei gas attraverso un suolo naturale. Tale parametro dipende dalle proprietà e dalle condizioni specifiche del suolo come la porosità, la struttura, la tortuosità, la superficie specifica, la saturazione in aria del gas etc.... I metodi di laboratorio, usati per la misura della permeabilità dei suoli ai gas, consistono di speciali apparecchiature di filtrazione in cui il campione di suolo è attraversato in una direzione da un flusso di gas.

Generalmente, il trattamento del campione richiesto da questi metodi (raccolta del campione, trasporto ed inserimento nell'apparecchiatura di misura) modificano profondamente tutte le proprietà del suolo e i risultanti valori di permeabilità potrebbero essere affetti da grossi errori. Per risolvere questo problema, vari metodi empirici sono stati sviluppati al fine di misurare la permeabilità dei suoli direttamente in campo.

Nella sezione di Palermo dell'INGV<sup>4</sup> è stato sviluppato un nuovo metodo per misurare la permeabilità *in situ* basato sulla teoria della advezione radiale dei gas in un mezzo poroso isotropo. Il modello mostra la relazione esistente tra la permeabilità ed il gradiente di pressione indotto nel suolo da una sorgente radiale e continua di gas.

Pompando un flusso noto e costante di gas attraverso un mezzo poroso isotropo sono generate delle superfici isobare di forma sferica. Secondo il modello dell'advezione radiale dei gas attraverso i mezzi porosi (Camarda et al., 2004), la differenza di pressione tra due gusci sferici è una funzione univoca del flusso e della permeabilità del suolo. Misurando tali parametri e pochi altre caratteristiche geometriche della sonda, è possibile calcolare la permeabilità attraverso un'equazione simile a quella uni-dimensionale di Darcy. Il metodo è stato testato in laboratorio e in seguito usato per misurare la permeabilità dei suoli in diverse aree nell'isola di Vulcano (Arcipelago delle Eolie, Italia) e nel Mt. Etna. Misure ben accurate del flusso di CO<sub>2</sub> emesso dai suoli possono essere compiute accoppiando, in ogni sito di misura, questo metodo al metodo della concentrazione dinamica (Camarda et al., 2004).

#### 1.5.1.3 TECNICHE PASSIVE.

Di questa categoria fa parte il metodo della camera di accumulo ("*accumulation chamber methods*", ACM) che verrà analizzato in dettaglio nel capitolo 3, in questo paragrafo si danno solo degli accenni. Il metodo è basato sulla misura della concentrazione del gas in aumento all'interno di un contenitore generalmente di forma cilindrica (*camera di accumulo* o nota anche come *camera di flusso*) di dimensioni e volume noti.

Questa tecnica fornisce notevoli vantaggi in particolare costi contenuti, tempi di risposte brevi, applicabilità dell'analisi ad una vasta gamma di gas, possibilità di miglioramento della sensibilità dello strumento in base alle condizioni del sito variando il volume della camera.

I principali svantaggi sono dati dalla necessità di un numero elevato di misure affinché si possa fornire, in fase di elaborazione, un risultato rappresentativo della zona di indagine,

<sup>4</sup> INGV sta per Istituto Nazionale di Geofisica e di Vulcanologia.

inoltre le misure potrebbero essere influenzate dalle condizioni che si hanno nell'interfaccia suolo-atmosfera (questi problemi possono essere minimizzati operando in tempi brevi ed evitando le perturbazioni nella superficie del suolo).

Le camere di accumulo sono state impiegate estensivamente in diversi ambienti da quello agro-forestale per misurare il tasso di respirazione del suolo a quello vulcanico nel campo della sorveglianza in aree di particolare interesse, a quello ancora delle discariche dei rifiuti solidi urbani e di quelle dei rifiuti pericolosi per la determinazione dei flussi di biogas (Cardellini C. et al., 2003). *Le camere di accumulo possono essere usate staticamente o dinamicamente.*

La camera statica consiste nell'analisi di un volume di aria sigillato all'interno di un contenitore posto sulla superficie della discarica (Figura 1.9a). In tale volume la variazione della concentrazione del gas esaminato è misurata in un intervallo di tempo che va normalmente da trenta minuti a due ore. Durante questo tempo l'atmosfera della camera viene campionata almeno da quattro a sei volte. Dal momento che il flusso di gas è dominato dalla diffusione, la concentrazione di biogas raggiungerà un massimo nella camera statica e l'emissione netta decrescerà a zero. Le concentrazioni vengono plottate in funzione del tempo e viene calcolata la pendenza e il coefficiente di regressione di una curva di regressione lineare (Fischer C., 1999).

Nella modalità dinamica un flusso di aria noto passa attraverso la camera (Figura 1.9b). Le concentrazioni di gas nell'aria sono misurate prima e dopo l'attraversamento della camera e il tasso di emissione di *LFG* è calcolato in base alla variazione in concentrazione e al flusso. Il limite fondamentale di questa tecnica è che il flusso di gas dipende dal flusso d'aria imposto dall'operatore attraverso la camera, in quanto esso determina la direzione del bilancio di flusso tra suolo e la camera d'aria, infatti si crea un disequilibrio di pressione con conseguente variazione del flusso naturale. (Raco B. et al., 2005).

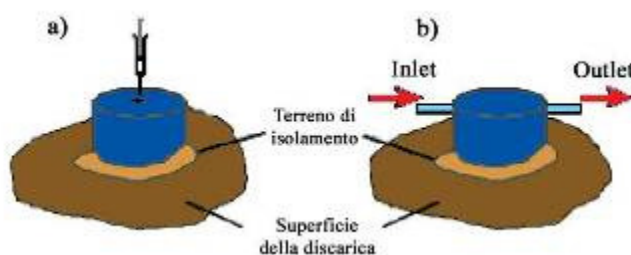


Figura 1.9: Camera di accumulo: a) modalità statica, b) modalità dinamica.

Queste tecniche sono particolarmente usate per ottenere indicazioni su come il flusso di gas dipenda dai fattori specifici del sito come le caratteristiche superficiali, l'umidità del suolo, la vicinanza di pozzi di estrazione del gas ecc.. Per ricavare il valore del flusso globale di un'intera discarica è tuttavia richiesta un'ampia serie di misure casuali che ricopra l'intera superficie di indagine come descritto da Logerkvist (1999).

## 1.5.2 METODI INDIRETTI.

Sono detti anche atmosferici e sono i metodi alternativi a quelli diretti, che si differenziano da questi ultimi per il fatto che, durante l'indagine, non prevedono l'impiego di strumentazione direttamente a contatto con il suolo nel punto da investigare e che possono essere considerati per questo meno invasivi. Le principali tecniche documentate e menzionate dalla letteratura specifica internazionale sono:

- ***metodo tracciante***
- ***metodi micrometeorologici***
- ***telerilevamento all'infrarosso termico.***

### 1.5.2.1 METODO TRACCIANTE.

Le ricerche nel campo delle emissioni gassose da discarica hanno prodotto una serie di tecniche sperimentali tra le quali quelle che si basano sull'uso di sostanze gassose inerti, *traccianti* per l'appunto. È una tecnica relativamente semplice e lineare che, in condizioni meteorologiche favorevoli, è in grado di fornire le misure delle emissioni totali di metano con un'accuratezza del 15-30% (Galle Bet al., 2001). Questo metodo è stato largamente testato e sono state fornite delle varianti soprattutto in merito alla strumentazione impiegata. Tra gli studi più interessanti riguardo l'uso di questo metodo, per determinare il tasso di emissione di metano da discarica, sono da citare quelli condotti da Trégourès et al. (1999) nella discarica della città di Rochy-Condé, quelli di Mosher, Czepiel nella discarica di Nashua, Stati Uniti, e quelli di Galle et al. (2001) in Svezia.

Questa metodologia consiste nel rilasciare sulla superficie emittente della discarica un gas tracciante in modo da simulare l'emissione di biogas, l'uso del gas tracciante permette quindi di individuare le fughe di gas. La scelta del tracciante è stabilita tenendo conto delle seguenti condizioni:

- ❖ il gas tracciante deve essere chimicamente stabile e quindi non reattivo;
- ❖ la concentrazione del gas tracciante nell'aria deve essere nulla o trascurabile;
- ❖ non deve essere tossico per non creare rischi alla salute umana;
- ❖ non deve essere solubile in acqua.

La specie comunemente usata come gas tracciante negli esperimenti è l'*esafluoruro di zolfo* ( $SF_6$ ) poiché soddisfa le condizioni precedentemente elencate, si trova a basse concentrazioni in atmosfera ed è facilmente rilevabile dagli strumenti di analisi anche a basse concentrazioni (Mori T. et al., 2001). Per maggiore completezza occorre sottolineare che alcuni autori hanno mosso critiche nei confronti dell'uso di questo gas come tracciante. Le ragioni di tali disaccordi risiedono nel fatto che l'*esafluoruro di zolfo* è un gas serra estremamente potente e ha un GWP<sup>5</sup> pari a 24900, il che vuol dire che una tonnellata di  $SF_6$  provoca un aumento

<sup>5</sup> Per meglio definire l'apporto che ogni determinato gas serra fornisce al fenomeno del riscaldamento globale, si è concepito il potenziale di riscaldamento globale (**Global Warming Potential, GWP**). Questo valore rappresenta il rapporto fra il riscaldamento globale causato in un determinato periodo di tempo (di solito 100 anni) da una particolare sostanza ed il riscaldamento provocato dal biossido di carbonio nella stessa quantità. Così, definendo il GWP della  $CO_2$  pari a 1, il metano ha GWP pari a 21,

dell'effetto serra pari a quello causato da 24900 tonnellate di  $\text{CO}_2$ . Per questo motivo in altri esperimenti si è preferito come alternativa al  $\text{SF}_6$  il *protossido di azoto*,  $\text{N}_2\text{O}$  che ha un GWP uguale a 120 (Galle B. al., 2001).

Il gas tracciante viene rilasciato da contenitori cilindrici, *canister*, posizionati sopravento lungo la superficie emittente della discarica perpendicolarmente alla direzione del vento prevalente. Il flusso rilasciato viene controllato da un rotametro e dopo ogni misura i cilindri vengono pesati per controllare la quantità rilasciata di gas.

In queste condizioni operative vengono analizzate la concentrazione del tracciante  $C_t$  e quella del metano  $C_m$ . Dalla conoscenza del rapporto delle concentrazioni dei gas nella miscela e dei pesi molecolari ( $M_t$  e  $M_m$ ) ed essendo noto il tasso di emissione del tracciante  $Q_t$ , il flusso di metano viene calcolato con la seguente equazione:

$$Q_m = Q_t * \frac{C_m * M_m}{C_t * M_t} \quad (1.19)$$

Se il tracciante rilasciato simula bene la sorgente emittente, si può ottenere una buona stima dell'emissione. La qualità della simulazione è confermata dalla variazione in rapporto tra la sorgente del gas e il tracciante nei diversi campioni.

Nell'ipotesi in cui come gas tracciante venga impiegato il  $\text{SF}_6$  si può osservare che nonostante ci sia una significativa differenza tra i pesi molecolari di  $\text{CH}_4$  e di  $\text{SF}_6$  (16 e 146  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$  rispettivamente), la miscelazione non viene inibita. E' stato dimostrato che gli effetti della diffusione molecolare dovuti alla differenza di peso sono di diversi ordini di grandezza più piccoli degli effetti della turbolenza nell'atmosfera (Stull, 1988, Lamb et al., 1995).

In Figura 1.7 viene riportato uno schema essenziale ma esplicativo del metodo in questione.

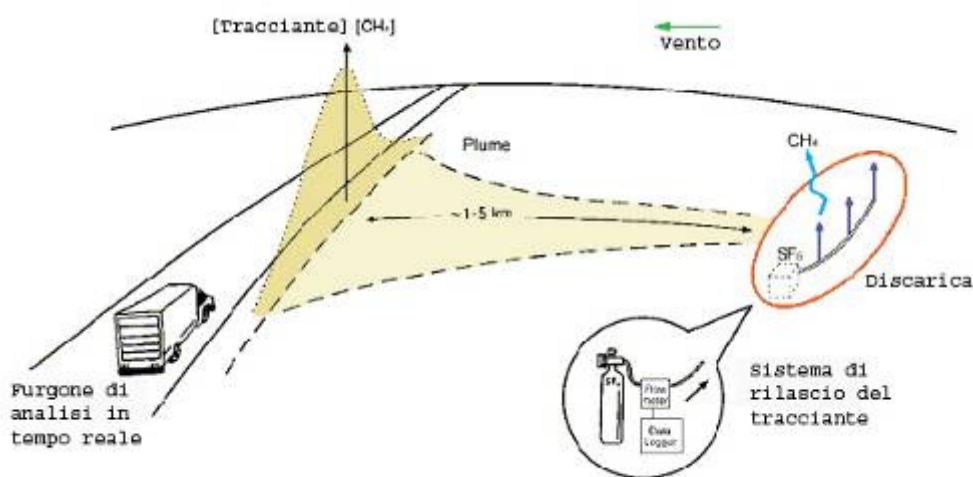


Figura 1.10: Rappresentazione grafica del metodo tracciante. (Czepiel P. M., et al., 2003)



Le distanze di misura delle concentrazioni del metano e del gas tracciante sono scelte in funzione delle caratteristiche del sito e/o degli strumenti in dotazione per le analisi, e comunque devono essere tali da garantire una buona miscelazione tra i due gas. In alcuni casi la presenza di una strada locale in prossimità del sito ne determina la scelta rendendo più agevole il trasporto della strumentazione attraverso veicoli; in altri casi adottando degli strumenti ottici le distanze sono definite in base alla sensibilità dello strumento stesso (generalmente si fa riferimento a percorsi ottici ampi con lunghezze tipiche di 50÷1000 m, riuscendo conservare una buona sensibilità dello strumento in modo da rilevare nella miscela anche frazioni di poche ppb).

Le indagini vengono svolte con dei dispositivi capaci di fornire quasi istantaneamente i rapporti delle miscele di metano e del tracciante rilevati nei “*plume*” in controvento. Come analizzatore in tempo reale del CH<sub>4</sub> viene usualmente adottato un sensore ad infrarosso<sup>6</sup> e la radiazione ad infrarosso viene prodotta da un laser HeNe. Questo strumento ha un’elevata sensibilità, riesce a percepire variazioni dei rapporti di miscela di 5 ppbv di CH<sub>4</sub>. Il tempo di risposta è pari a quello che il flusso di gas impiega per raggiungere la cella di analisi, solitamente qualche decina di secondi al massimo. Contemporaneamente alle misure di metano viene rilevata anche la concentrazione del gas tracciante. Un altro detector, analizza la CO<sub>2</sub> e viene adottato per individuare sorgenti anomale di metano. Rapporti significanti di miscele di CH<sub>4</sub> accompagnati da alti valori di CO<sub>2</sub> sono caratteristici di processi di combustione. (Mosher Byard W., et al. 1996; Czepiel P. M., et al., 2003).

In conclusione al metodo si sottolinea che esso è applicabile in tutte quelle situazioni in cui non si hanno interferenze di sorgenti esterne che possono falsare le misure, in cui si ha un segnale “pulito” in modo da poter essere letto ed una sorgente di emissione abbastanza forte in modo che il segnale in controvento possa essere acquisito ad una distanza tale che sia assicurata una buona miscelazione tra il gas tracciante e quello da analizzare. Da letteratura specifica (Trégourès et al. 1999) si osserva che i risultati prodotti dall’applicazione di questo metodo portano a valori di flussi dello stesso ordine di grandezza di quelli ottenuti con il metodo tradizionale della camera di accumulo, nonostante ciò alcuni ricercatori sostengono che l’uso di traccianti sia utilmente adottabile solo come fase di indagine preliminare per la valutazione dell’eventuale necessità conseguente di accurate indagini dirette (Lewis et al. 2003; Trégourès A. Et al., 1999).

#### 1.5.2.2 METODI MICROMETEREOLOGICI.

La *micrometeorologia* è una branca della meteorologia che studia la parte bassa della troposfera. E’ in questa porzione di atmosfera che ha luogo il trasporto e la diffusione degli inquinanti emessi nei pressi della superficie terrestre. Anche se a rigore tale fenomeno non è confinato in una porzione ben definita di atmosfera, l’evidenza sperimentale mostra che la maggior parte dell’inquinamento atmosferico derivante da sorgenti che emettono in prossimità del suolo resta intrappolato in una porzione limitata di troposfera.

<sup>6</sup> Il metano presenta una assorbimento nello spettro dell’infrarosso con  $\lambda=3.39 \mu\text{m}$ .



La troposfera è definita come quello strato d'aria, dello spessore medio di circa 11 Km alle nostre latitudini, a contatto diretto con la superficie terrestre, con caratteristiche chimico-fisiche molto differenti da quelle tipiche delle parti più elevate dell'atmosfera. La ragione di tale individualità risiede nel fatto che le grandezze meteorologiche che la contraddistinguono sono fortemente influenzate dalla presenza della superficie terrestre e sono variabili con la quota. Quando, dentro alla troposfera, si analizza l'atmosfera a quote inferiori rispetto allo spessore massimo, si notano nei profili verticali delle principali variabili meteorologiche, discontinuità e variazioni tanto significative da evidenziare nelle immediate vicinanze della superficie terrestre uno strato d'aria (dello spessore dell'ordine del chilometro) con caratteristiche chimico-fisiche ben definite (Sozzi R., et al., 2002).

Per quanto riguarda la letteratura sull'applicazione dei metodi micrometeorologici alle emissioni di biogas da discarica si può far riferimento solo ad un numero limitato di ricerche, tra l'altro aventi indicazioni non esaustive e risultati non univoci, a significare che l'investigazione in questo campo è ancora poco sviluppata ma in cui si intravedono comunque prospettive sicuramente interessanti. Si forniscono ora delle brevi descrizioni dei metodi micrometeorologici più promettenti su cui si sta concentrando la ricerca attuale:

- **Bilancio di massa**
- **Correlazione turbolenta** ("Eddy Correlation", EC)

Essi sono basati sulle teorie del trasferimento turbolento nello strato limite superficiale dell'atmosfera. Questi metodi in congiunzione con l'uso di un "Tunable Diode Laser" permettono di avere, secondo alcuni autori, delle stime molto accurate del flusso di metano. Nell'esperienza di Trégourès et al (1999) viene mostrato come, settando il TDL nella banda di assorbimento del metano a  $2989\text{ cm}^{-1}$ , l'accuratezza relativa di questo strumento è vicino al 2% per un'analisi in frequenza di 10 Hz ("Eddy Correlation") mentre è di 0,7 % per un intervallo di integrazione di 1 secondo ("Mass Balance"). Le misure sono state prese con delle antenne trasmettenti montate al centro della discarica, il campione da analizzare viene fatto circolare in una cella a multipassaggio garantendo così un percorso ottico di 30 m (Trégourès A., et al. 1999).

#### i) Bilancio di massa.

In questo metodo, basato sull'applicazione del principio della conservazione di massa, il flusso è espresso come segue:

$$F_c = \frac{1}{x} \int_0^{z_c} u(c - c_b) dz \quad (1.20)$$

con  $x$  viene indicato il raggio di azione dello strumento,  $u$  è la componente orizzontale della velocità del vento,  $C_b$  è la concentrazione sopravento di  $\text{CH}_4$  in discarica, infine  $z_c$  è l'altezza dello strato limite.

La componente orizzontale della velocità del vento e il profilo delle concentrazioni di metano vengono misurate lungo tutta l'altezza dello strato limite interessato dalla presenza delle sorgenti di metano. Tali misure vengono eseguite mediante l'utilizzo di una speciale antenna

dotata di misuratori di altitudine, di termo-coppie e di anemometri in numero uguale al numero di misure di altezze che si intendono fare (Trégourès A., et al. 1999; Oonk H., et al., 2000).

ii) *Correlazione Turbolenta* (“*Eddy Correlation*”).

Dopo circa 40 anni dai primi utilizzi, oggi questa tecnica di misura si è molto diffusa per la valutazione degli inquinanti gassosi nelle grosse città, o ancora nello studio degli ecosistemi forestali<sup>7</sup> grazie soprattutto alla commercializzazione di strumenti scientifici con alte performance di analisi e acquisizione. Nel 1995 un gruppo di scienziati ha raccomandato l'uso di questa tecnica di misura per cercare di chiudere il bilancio del carbonio e dell'acqua a scala regionale e globale, a seguito dell'iniziativa sono poi nati una serie di network internazionali di stazioni eddy covariance oggi attivi come Euroflux, Ameriflux e Fluxnet che contano più di 250 torri di misura che raccolgono dati in continuo.

La tecnica della correlazione turbolenta prevede l'installazione di strumenti alla sommità di una torre che sovrasta di qualche metro la superficie che emette o assorbe gas. Purtroppo si hanno limitati esempi di applicazione di questa tecnica nelle discariche, comunque dai pochi esperimenti si è cercato di individuare le caratteristiche principali del metodo e la sequenza da eseguire per la valutazione dei flussi di biogas.

Nel processo di misura con l'*eddy correlation*, il primo passo è quello di determinare i valori della componente verticale media della velocità del vento e il valore medio della concentrazione del gas da individuare che vengono ricavate rispettivamente dalle serie temporali delle perturbazioni delle componente verticale della velocità del vento  $w'$  e di quelle delle concentrazioni  $c'$  (Werle P., et al., 2001). Il flusso del gas in un determinato punto dello spazio e tempo viene calcolato con questa equazione:

$$F = \overline{w' \cdot c'} \quad (1.21)$$

Le ipotesi impiegate per dedurre la (1.12) partendo dall'equazione completa del bilancio di massa sono essenzialmente due: omogeneità orizzontale del sito in cui vengono fatte le misure e stazionarietà atmosferica. L'ipotesi di omogeneità si riferisce alla disposizione spaziale delle sorgenti di emissione della specie analizzata, e alle caratteristiche orografiche del sito. In particolare secondo questa ipotesi le sorgenti devono essere distribuiti uniformemente nel piano orizzontale. Inoltre il terreno deve essere pianeggiante. Oltre all'ipotesi di omogeneità c'è quella di stazionarietà dell'atmosfera, ovvero il valore medio delle variabili fisiche che descrivono lo stato dell'atmosfera non deve cambiare nel tempo. Questa ipotesi è vera se si considerano finestre temporali inferiori a 60 minuti (Kaimal & Finnigan 1994, Finnigan et al. 2003) e generalmente i flussi stimati con la tecnica *EC* si riferiscono a intervalli di 30 minuti.

<sup>7</sup> Valutazione quantitativa degli scambi di carbonio e per lo studio dell'ecofisiologia negli ecosistemi. Essa può essere impiegata per analizzare la risposta dei flussi di anidride carbonica alle variabili climatiche, quali temperatura, umidità e radiazione solare.

L'ipotesi di stazionarietà è generalmente rispettata nella realtà, mentre per quella di omogeneità è necessario scegliere il sito di misura secondo specifici criteri difficili da soddisfare. Per questo i ricercatori hanno sviluppato metodi per correggere le misure ottenute dalla tecnica EC. Generalmente queste correzioni vengono implementate nei periodi notturni in cui il rimescolamento turbolento dell'atmosfera è fortemente ridotto.

Le procedure di correzione adottate sono di due tipi: sostituire il dato misurato con il flusso stimato tramite una parametrizzazione empirica. La sostituzione dei dati di flusso misurati in periodi di bassa turbolenza si basa sull'uso di funzioni empiriche che esprimono la dipendenza del flusso da specifiche variabili climatiche. Queste funzioni vengono costruite mediante una regressione statistica tra i flussi misurati in condizione di elevata turbolenza e i corrispondenti valori delle variabili climatiche (Baldocchi D. D., 2003).

Per scambi convettivi turbolenti,  $F$  è altamente variabile nello spazio e nel tempo per cui l'equazione precedente viene intergrata su di un intervallo di tempo molto più grande di quello relativo alle frequenze più alte. Le misure di norma vengono acquisite a frequenze maggiori o uguali a 10 Hz, quindi 10 o più misure al secondo. Affinché sia verificata la condizione della conservazione della massa la componente media verticale del vento deve essere nulla nell'intervallo di misura.

Il termine a destra dell'equazione (1.12) è una covarianza misurabile direttamente dai sistemi EC attualmente disponibili, i quali sono costituiti da un anemometro ultrasonico tridimensionale e da un analizzatore per la determinazione della concentrazione. Sia l'anemometro che l'analizzatore devono avere tempi di risposta molto rapidi, in modo tale da misurare anche le piccole fluttuazioni di concentrazione e di velocità del vento che avvengono su una scala temporale dell'ordine dei decimi di secondo (Trégourès A., et al., 1999). La necessità di avere strumenti a risposta veloce è strettamente legata alla natura del trasporto turbolento in atmosfera. I vortici di aria che percorrono la parte più bassa della troposfera sono masse d'aria animate da un moto turbolento; il carattere turbolento del loro moto determina in un dato punto dello spazio delle fluttuazioni stocastiche sia nella concentrazione di un particolare scalare che nella velocità del vento. Queste fluttuazioni altro non sono che i termini che compaiono nell'equazione (1.12) e che costituiscono il flusso turbolento verticale; da un punto di vista statistico maggiore è il numero di fluttuazioni misurate in dato intervallo temporale e maggiore sarà la rappresentatività statistica della stima di flusso.

L'anemometro ultrasonico tridimensionale si differenzia in modo sostanziale dai normali anemometri per il principio di funzionamento, per la qualità della misura e per le grandezze fisiche misurate. La stima dei parametri turbolenti risulterebbe meno precisa se eseguita utilizzando i dati forniti dai comuni sensori meteorologici perché questi non sono adatti a rilevare le fluttuazioni della grandezza misurata a causa del tempo di risposta strumentale. Inoltre i sensori convenzionali presentano dei limiti strutturali che impediscono l'indagine di particolari fenomeni atmosferici a microscala. Il sensore ultrasonico tridimensionale misura le tre componenti del vettore vento e la temperatura virtuale con una elevata frequenza di campionamento (10 Hz), rendendo così accessibile la misura diretta della turbolenza atmosferica.

Riassumendo brevemente la tecnica micrometeorologica dell'eddy correlation potrebbe costituire una possibile alternativa alla camera di accumulo; i vantaggi che offre sono (Werner C., et al., 2003; Werner, J. C. et al. 2000):

- ❖ misure non distruttive, infatti non si alterano le condizioni ambientali (vengono fatte al di sopra del suolo e quindi non interferiscono con l'emissione naturale del gas dal suolo);
- ❖ misure medie nello spazio dei flussi riferita ad una determinata area di base di riferimento (*"foot-print"*);
- ❖ misure che avvengono in continuo (*"long term measurement"*), utile quindi nei casi in cui si voglia un monitoraggio in continuo;
- ❖ misure rappresentative della variabilità dell'area sorgente (area sopra-vento)

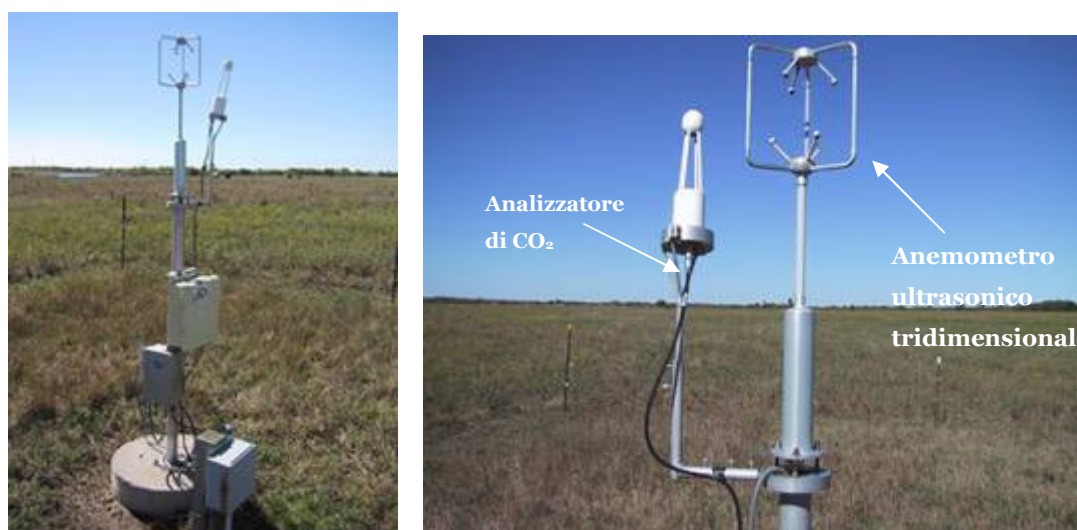


Figura 1.11: Antenne dotate di anemometro ultrasonico e analizzatore di gas usate con la tecnica dell'eddy-correlation. Queste antenne vengono sistemate su delle torri di misura alte qualche metro.

### 1.5.2.3 TELERILEVAMENTO.

Nei campi di monitoraggio ambientale e dell'investigazione dei fenomeni naturali, si è affermata, da oltre un decennio, la tendenza ad affidare le indagini a tecniche innovative come ad esempio il telerilevamento da satellite, da mezzo aereo o da terra, che permettono l'analisi di una grande varietà di fenomeni.

L'acquisizione delle informazioni, mediante tali tecniche, avviene a distanze anche considerevoli, come nel caso del telerilevamento da satellite.

Grazie a strumenti tecnologicamente sempre più avanzati è oggi possibile una valutazione integrale degli aspetti caratteristici degli strati di terreno e della copertura vegetale (come temperatura e umidità) che costituiscono elementi fondamentali per la definizione dello stato dei processi in corso.

Qualunque sia il sensore impiegato nella raccolta dei dati, la tecnica si basa sull'analisi dello spettro elettromagnetico emesso dal corpo investigato. Le radiazioni elettromagnetiche emanate dai vari corpi contengono, infatti, diverse informazioni dell'elemento investigato, che

vengono raccolte a distanza dal sensore ricevente. Le elaborazioni di questi dati mediante tecniche di analisi delle immagini restituiscono come prodotto delle mappe tematiche dove, a diversi colori corrispondono specifiche informazioni. Si dispone così di uno strumento che consente di avere indicazioni anche su superfici di notevole estensione, senza ricorrere alle tradizionali e prolungate campagne di monitoraggio in sito.

#### 1.5.2.4 PRINCIPI BASE DEL TELERILEVAMENTO.

---

Affinché si possa operare con tecniche di telerilevamento, occorre considerare quattro elementi:

- ❖ sorgente di radiazione (sole, flash, radar);
- ❖ percorso trasmissivo (atmosfera);
- ❖ scena investigativa (suolo);
- ❖ sensore (scanner, pellicola, fotografia)

##### *i) La sorgente di radiazione.*

Fornisce l'energia che giungerà al sensore; tale sorgente può essere esterna al sensore (telerilevamento passivo). La sorgente esterna al sensore più comunemente utilizzata è il suolo. L'energia riflessa dalla superficie terrestre viene misurata nei campi del visibile e dell'infrarosso; se invece la sorgente utilizzata è un *radar*, l'energia riflessa, o retrodiffusa, si valuta nella regione delle microonde. Indipendentemente dalla sorgente, tutti i corpi con temperature allo zero assoluto emettono energia (legge di Plank) che può essere misurata, tramite il telerilevamento nell'infrarosso "termico" o nelle microonde in modo passivo.

##### *ii) Il percorso trasmissivo.*

Solitamente l'atmosfera può influire significativamente sulla regione dello spettro che può essere utilizzata: i gas atmosferici, infatti, interagiscono selettivamente con la quantità di energia trasmessa, disturbando il segnale originale. Esistono però cosiddette "finestre atmosferiche" ovvero intervalli di lunghezza d'onda all'interno dei quali l'atmosfera ha un effetto nullo, o comunque minimo, sull'intensità della radiazione proveniente dal suolo o su quella emessa-riflessa dalla terra.

Occorre inoltre considerare anche l'azione del particolato, quale fumo o polvere, che può interferire con il percorso di trasmissione, tramite diffusione o assorbimento, nell'intero spettro elettromagnetico.

Gli intervalli di lunghezza d'onda che interessano la ricerca e lo studio delle discariche e/o i siti inquinati sono essenzialmente i seguenti:

- ✓ 0,35-0,75 mm luce visibile
- ✓ 0,75-1,00 mm IR (infrarosso) vicino
- ✓ 1,00-3,00 mm IR medio
- ✓ 3,00-15,0 mm IR lontano
- ✓ 1 mm-300 cm Microonde

Per le lunghezze d'onda dell'IR lontano, indicativamente comprese tra 8 e 13 mm, si usa correntemente il termine "intervallo dell'IR termico" o "IR termico".

*iii) La scena investigata.*

E' il soggetto dell'osservazione; il telerilevamento si basa sull'interpretazione delle caratteristiche spettrali, geometriche e temporali della scena investigata. Queste caratteristiche possono essere proprie della superficie o essere modificazioni di parametri misurabili alla superficie ma indotte da variazioni nel sottosuolo. Le caratteristiche spettrali sono legate al comportamento dell'oggetto investigato in termini di ripartizione dell'energia emessa alle differenti lunghezze d'onda. Dall'osservazione delle caratteristiche curve spettrali che si ottengono dalle misure si nota una netta distinzione tra gli elementi acqua, suolo e vegetazione.

Altri fattori che consentono di aumentare la risoluzione dell'informazione sono:

- le caratteristiche geometriche consentono il riconoscimento degli oggetti in base alla loro forma;
- le evoluzioni temporali permettono di cogliere quei fenomeni che variano con il trascorrere del tempo.

*iv) Il sensore.*

È il mezzo grazie al quale è possibile ottenere le informazioni del territorio, conoscendo a priori il fenomeno da osservare è possibile scegliere il sensore con le caratteristiche appropriate in termini di risoluzione geometrica (livello di dettaglio), spettrale (bande utilizzabili), temporale (tempo di rivisitazione, vale a dire l'intervallo tra una ripresa e l'altra) e sensibilità.

#### 1.5.2.5 TELERILEVAMENTO AEREO.

---

Un velivolo, opportunamente equipaggiato con sistemi di telerilevamento, costituisce un mezzo estremamente flessibile e completo per il controllo di parametri ambientali.

I vantaggi del telerilevamento da velivolo sono numerosi. In particolare il volo aereo offre la possibilità di variare, anche in brevi tempi, diversi parametri caratteristici del rilevamento.

Infatti regolando direzione, quota, e velocità di volo, si è in grado di evidenziare elementi particolarmente significativi, o seguire traiettorie anomale.

La risoluzione geometrica ottenibile da velivolo, poi, è funzione della quota, risultando molto elevata alle quote di rilevamento generalmente impiegate (da 300 m a 3000m).

Anche la risoluzione radiometrica è in funzione della quota essendo l'attenuazione della radiazione rilevata, causata dalla presenza dell'atmosfera, minore a bassa quota. Inoltre il telerilevamento aereo, grazie alla possibilità di volo a bassa quota, è meno soggetto alla variabilità delle condizioni atmosferiche ed in particolare alla presenza di masse d'aria umida. Il telerilevamento da velivolo presenta però alcune limitazioni. Tra queste vi è la necessità di

impiegare personale tecnico addestrato ed equipaggiamenti costosi, ed operare in condizioni logistiche non sempre ottimali.

#### 1.5.2.6 APPLICAZIONI DEL TELERILEVAMENTO AEREO ALLO STUDIO DELLE DISCARICHE DI RSU.

Lo scopo di un'analisi ambientale di siti potenzialmente inquinanti, quali quelli costituiti da discariche, è di ottenere informazioni che individuino l'impatto sul territorio circostante dato da eventuali flussi di contaminati prodotti nel corpo della discarica stessa (percolato, biogas). L'entità dell'impatto di tali flussi è ovviamente legato alla tipologia dei rifiuti depositati (abbastanza uniforme nel caso dei Rifiuti Solidi Urbani) e al grado di stabilizzazione del rifiuto stesso, questo ultimo a sua volta dipendente dal tempo trascorso tra dalla deposizione e dalle condizioni ambientali caratterizzanti il cumulo (temperatura, grado di umidità, ecc.). Le informazioni ottenute sono in genere puntuali, in quanto legate ad un ristretto numero di campionamenti e richiedono delle procedure di estrapolazione per ottenere un'informazione rappresentabile sotto forma di carta tematica del rischio. Questo passaggio comporta inoltre un certo grado di soggettività. L'aumento di risoluzione dell'informazione, ovvero del numero di campionamento e delle relative analisi comporta in genere costi onerosi.

Una possibilità di ottenere informazioni diffuse sull'intero sito investigato viene offerta dall'impiego delle tecniche di telerilevamento ed in particolare telerilevamento aereo (Grancini et al., 1992).

Nello studio di una discarica tramite il telerilevamento aereo, la sorgente di energia può essere il sole (telerilevamento passivo) e/o il calore sviluppato dai processi di degradazione della sostanza organica depositata nell'abbanco (telerilevamento attivo). I parametri fisici misurati sono le emissioni nell'infrarosso termico e la riflessione, nei campi del visibile e dell'infrarosso vicino, della superficie terrestre a seguito di irraggiamento solare.

Oltre 25 anni di esperienze nel telerilevamento, aereo e da satellite hanno messo in luce l'importanza di definire, per ciascuna tipologia di elemento investigato, una metodologia di analisi che permetta di ottenere dei risultati ripetibili e tra loro confrontabili.

In particolare nel campo delle discariche per valutare l'impatto da esse provocato, possono essere presi in considerazione due aspetti:

- ❖ lo stato di salute della vegetazione sulla copertura finale della discarica, che viene studiata tramite diverse elaborazioni come l'Indice di Biomassa, il falso colore e l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ossia l'indice che tiene conto delle bande tipiche, sia d'assorbimento che di riflessione dell'energia solare da parte delle piante
- ❖ le anomalie termiche rilevabili dallo studio dell'informazione termografica e delle relative elaborazioni

#### Studio della Termografia

I materiali organici portati in discarica di RSU e messi in condizioni di anaerobicità per ricoprimento con strati di terreno, diventano sede di processi di digestione a opera di diversi ceppi batterici. I principali prodotti di tale digestione sono il biogas e il percolato.

Il biogas consiste in una miscela di gas composta prevalentemente da metano, anidride carbonica e idrogeno solforato.

Nelle discariche e, in special modo in quelle abusive, prive pertanto di impianti di convogliamento del biogas, questa miscela gassosa, che ha mediamente una temperatura superiore ai  $30^{\circ}\div 40^{\circ}\text{C}$ , tende a risalire attraverso gli strati di rifiuto e terreno di ricoprimento che costituiscono il corpo stesso della discarica finché raggiunta la superficie, si libera nella atmosfera. Durante la risalita verso l'alto il biogas cede calore per convezione e conduzione alle zone circostanti; l'effetto complessivo è un riscaldamento della superficie di copertura del corpo di discarica con conseguente irraggiamento di calore, evidenziabile come anomalia positiva ( $DT>0$ ) nella termografia (Spokas et al., 2003).

Poiché la miscela di gas e di vapor d'acqua è trasparente alla radiazione infrarossa, nell'intervallo elettromagnetico impiegato, è possibile rilevare le tracce termiche nell'intorno dei punti di emersione.

Occorre ricordare che il biogas tende a muoversi non solamente in verticale, ma anche lungo direzioni diverse ogni qual volta esistano fessurazioni, vuoti, o vie preferenziali che gli permettono di accumularsi ed emergere. Può essere inoltre veicolato dall'acqua e crearsi vie di fuga in occasione di improvvisi rilasci tensionali o assestamenti prodotti dalla diminuzione del volume degli strati di rifiuto, a seguito di digestione o compattamento non efficace.

L'estrema mobilità del biogas e la sua temperatura lo rendono particolarmente adatto all'analisi termografica.

Sia il biogas che il percolato presentano comunque un differente livello termico rispetto al terreno circostante l'abbanco e pertanto possono essere facilmente individuati e caratterizzati. Ciò comporta che le riprese termografiche debbano essere effettuati in condizioni tali (telerilevamento passivo) da evitare ogni possibile incidenza del riscaldamento solare (Del Pero et al., 1986) utilizzando un canale di misura idoneo per ottenere il massimo contrasto termico a temperatura ambiente.

Un'ulteriore problematica investe le difficoltà interpretative nell'analisi dei dati di tipo geofisico, perché le risposte spettrali possono risultare simili sia nei casi di deboli anomalie superficiali o in quelle di forti anomalie profonde. Infatti, elevati livelli esotermici profondi possono risultare deboli segnali in superficie a causa dello spessore di suolo entro il quale vengono veicolati e potendo venire ulteriormente limitati, in termini di irraggiamento effettivo, dalla dispersione eolica o dalla natura del soprassuolo per la comprensione dei delicati meccanismi propri dei siti adibiti a discarica, particolare attenzione deve essere pertanto prestata anche alle piccole (in termini areali e radiometrici) anomalie termiche positive.

La prima fase dell'indagine termografica mira a descrivere, più o meno sistematicamente, le anomalie termiche riscontrate sia all'interno del corpo della discarica che nel suo intorno più prossimo.



È importante che vengano prese in considerazione tutte le condizioni anomale riscontrabili sul territorio in oggetto; in particolare per ciascuna anomalia, deve essere indicata la forma, la dimensione, il segno e l'intensità del segnale. La semplice descrizione delle anomalie rilevate non è però sufficiente e deve essere seguita da una fase più propriamente interpretativa delle situazioni termiche esistenti.

Lo scopo principale è quello di cercare di dare un'interpretazione più completa possibile degli effetti termici, distinguendo l'aspetto più propriamente naturale, prevalentemente idrogeologico e geofisico, dagli effetti prodotti dalla presenza dell'abbanco di rifiuti.

La classificazione ottenuta mediante elaborazione di immagini telerilevate è comunque sufficientemente oggettiva, fatta salva l'attribuzione a fenomeni specifici che possono essere distinti unicamente attraverso la rilettura del contesto territoriale entro il quale l'indagine viene effettuata. Il fine ultimo è quello di oggettivare, quantificare (se è possibile) e visualizzare i fenomeni, indicandone particolari direzioni preferenziali dal punto di vista termofisico o aree potenzialmente interessati per successive analisi di dettaglio.

Il raggiungimento di una cartografia tematica, a partire dai dati telerilevati, è però subordinata alla conoscenza sia dei fenomeni termofisici tipici delle discariche che delle potenzialità effettive delle tecniche di telerilevamento adottate. In tal senso, l'analisi termografica si presta al riconoscimento di anomalie termiche indotte dai fenomeni ricollegabili all'idrologia del primo spessore del sottosuolo o a fughe di calore provocate dai processi di digestione anaerobica nel volume della discarica. Dal punto di vista termico il biogas produce delle anomalie di segno positivo, in quanto ha una temperatura propria comunque superiore a quella delle aree circostanti, malgrado abbia subito un progressivo raffreddamento per cessione di calore durante il movimento nel terreno.

Dall'elaborazione delle informazioni fornite da uno strumento di questo tipo si ha una mappa di temperatura rappresentata in falsi colori o in scala di grigi ottenuta in tempo reale, cioè durante l'osservazione della scena stessa.

Occorre comunque precisare che questo metodo sembrerebbe però adoperabile per un rapido screening conoscitivo iniziale (Cossu et al., 1997, Lewis et al., 2003, Muntoni, 2000) e quindi come elemento iniziale di analisi cui segue una tecnica investigativa di approfondimento (Mancini G., et al., 2004).

#### *Telerilevamento della composizione atmosferica mediante l'uso di un trasmissometro laser.*

E' un metodo di misura della concentrazione di un gas in atmosfera sufficientemente flessibile e robusto tanto da poter essere usato sia per rilievi occasionali che per realizzare sistemi di osservazione permanente; trova applicazione su aree con estensione da qualche decina di metro fino a circa 1-2 km.

Il campo di applicazione di questa tecnica è abbastanza ampio e spazia dal controllo di aree adibite a discarica (monitoraggio di confine per evidenziare fughe e concentrazioni di fondo di alcuni gas) a quello di emissioni inquinanti di aree industriali; dal monitoraggio delle

emissioni gassose naturali (ad esempio nelle aree vulcaniche), a quello della qualità dell'aria nei centri urbani.

La scelta di un laser in un dispositivo che deve ricavare misure di concentrazioni medie è ottimale per le sue caratteristiche di direttività, monocromaticità, e di densità spettrale di potenza.

Una sorgente direttiva è preferibile ad una isotropa perché nel cammino di lunghezza fra ricevitore e trasmettitore, ovvero su una tratta, la potenza utile che giunge al ricevitore è solo quella sottesa dall'angolo solido che investe il ricevitore.

Una sorgente anisotropa perderebbe gran parte della sua potenza su altre direzioni non "utili" limitando la massima lunghezza  $L$  del cammino di tratta.

Anche la monocromaticità è una caratteristica da preferirsi in quanto, per far sì che l'onda elettromagnetica interagisca solo con la specie di interesse, l'eccitazione deve occupare un intervallo di frequenza più stretto possibile in modo da operare in un picco di assorbimento della specie voluta senza coinvolger picchi di assorbimento vicini relativi a specie differenti. Una sorgente a spettro continuo, viceversa, provocherebbe l'interazione dell'eccitazione con più specie con la necessità di operare un filtraggio molto stretto nell'intorno della riga di assorbimento della specie considerata, quindi la potenza utile ricevuta, in tale intorno spettrale, sarebbe piccola rispetto alla potenza trasmessa, che invece trattandosi di una sorgente a spettro continuo interessa una vasta banda, e comunque sarebbe sicuramente più piccola rispetto a quella che si otterrebbe usando una sorgente monocromatica a parità di potenza di trasmissione.

Infine la densità spettrale di potenza, espressa in  $\text{Watt/m}^2 \cdot \text{Hz}$ , è un parametro fondamentale in quanto maggiore densità di potenza si ha a disposizione maggiore è la distanza  $L$  fra ricevitore e trasmettitore che garantisce un accettabile rapporto segnale rumore, maggiore sarà la portata del dispositivo. Sorgenti ad IR come i diodi laser permettono di generare radiazioni caratterizzate da larghezze di spettro dell'ordine di  $1\text{nm}$  e potenze dell'ordine di  $\text{mW}$ . Inoltre per le applicazioni di telerilevamento le radiazioni emesse da diodo laser, opportunamente filtrate, possono essere considerate monocromatiche. Quindi i diodi laser possono essere utilizzati per costruire apparati di trasmissione in grado di trasmettere radiazioni ad IR monocromatici verso un apposito ricevitore. (Mancini G., et al., 2004).

Il sistema di telerilevamento ottico basato su laser *TDL* (*Tunable Diode Laser*) ricava la concentrazione di una specie chimica in atmosfera mediante una misura trasmissometrica.

Per misure in campo aperto (*open-path*) il sistema è composto da una sorgente laser *TDL* che emette un fascio di radiazione elettromagnetica (generalmente nell'infrarosso); un retroriflettore (elemento passivo con la finzione di rinviare la radiazione nella direzione di arrivo); un ricevitore per la raccolta della radiazione trasmessa; un sistema di analisi dati.

La Figura 2.11 presenta uno schema del sistema di misura trasmissometrico: tutti gli elementi attivi del sistema (la sorgente laser e l'apparato di ricezione) stanno ad un estremo del percorso ottico che è chiuso all'altro estremo da un elemento passivo (il retroriflettore). In

questa configurazione di misura il fascio laser attraversa due volte la massa d'aria sotto indagine.

Durante l'attraversamento dell'atmosfera da analizzare, la radiazione del laser è parzialmente assorbita dai gas che compongono la massa d'aria stessa. Scegliendo opportunamente la lunghezza d'onda laser nella zona dello spettro elettromagnetico in cui si trova una riga di assorbimento del gas di analisi, è possibile ricavare la concentrazione media del gas nel tratto di atmosfera attraversato dal fascio (Mancini G., et al.,2004).



Figura 1.12: Schema del sistema di misura; la massa d'aria sotto indagine è quella compresa tra il laser e il retroriflettore.

Il metodo consente di ricavare la concentrazione complessiva integrata su tutto il cammino percorso dal fascio laser, espressa in *ppm-m* (parti per milione in volume metro), ovvero la concentrazione media espressa in *ppm* (parti per milione in volume), riferita al tratto di atmosfera attraversato dal fascio laser.

La sorgente laser può venire agevolmente accoppiata con cavi in fibra ottica ad alta trasmissione, in questo modo la luce proveniente da un'unica sorgente laser può essere ripartita su diversi connettori in fibra ottica, permettendo sistemi multipli di misura con un'unica sorgente laser. Ogni fibra ottica porta ad un'unità di trasmissione e ricezione del segnale ottico (testa laser), il segnale ricevuto è registrato da un sensore accoppiato all'unità di controllo tramite un cavo coassiale. Allo stato attuale è possibile l'installazione di sistemi multicanale che permettono sino ad 8 canali di misura.

Una coppia trasmettitore-ricevitore laser misura la concentrazione della specie chimica di interesse su percorsi ottici rettilinei.

Utilizzando percorsi ottici multipli dislocati su un'area estesa è possibile realizzare un insieme di misure simultanee che permettano di ricostruire il campo di concentrazione 2D e 3D sopra l'area di interesse per mezzo di opportune tecniche di elaborazione dati a carattere tomografico<sup>8</sup>.

La sensibilità del sistema di misura rappresenta la minima quantità di sostanza misurabile: è il valore di concentrazione, espresso in *ppm-m*, al di sotto del quale lo strumento fornisce una concentrazione pari a zero. Dato il valore di sensibilità, la quantità minima di sostanza misurabile dipende dalla localizzazione della sostanza stessa o meglio, dalla lunghezza del tratto percorso dal fascio laser all'interno della nube. Se la nube della sostanza in analisi è

<sup>8</sup> Per Tomografia si intende un processo matematico che permette di ricostruire un qualcosa a partire dalle sue proiezioni. Nel nostro caso il qualcosa è il campo di concentrazioni delle specie molecolari e le proiezioni sono le misure di concentrazione lineare, che in termini matematici, non sono altro che l'integrale di linea sul campo scalare delle concentrazioni.

localizzata su una piccola area, è necessaria una concentrazione più elevata di quanto non lo sia se la nube è estesa su tutta l'area attraversata dal fascio.

---

### 1.5.3 DISCUSSIONE: ESIGENZE ATTUALI E PROSPETTIVE FUTURE SUI METODI DELLE MISURE DELLE EMISSIONI GASSOSE.

---

Si è visto come le emissioni di biogas da discarica sono influenzate dalla combinazione di flussi sia convettivi che diffusivi. Le misure delle concentrazioni verticali nel sottosuolo tiene conto solo del trasporto diffusivo sebbene il coefficiente di diffusione nel suolo dovrebbe considerare le condizioni di pressione.

I metodi micrometeorologici, dall'altra parte, si basano sul moto convettivo in prossimità della superficie del suolo e sui processi di trasferimento turbolento. La tecnica della camera di accumulo consente di misurare il flusso globale, ma solo per aree molto piccole e in tempi brevi, cioè non idonea per un monitoraggio in continuo.

L'uso combinato di un gas tracciante e del FTRI appare promettente per la valutazione delle emissioni di alcuni gas individuali, ma non per i NMOC's<sup>9</sup> per i quali si dovrebbe pensare ad un altro approccio che non è stato ancora ben definito.

*Allo stato attuale non esiste un metodo univoco che riesca a contemplare contemporaneamente sia i processi che hanno luogo nel sottosuolo che quelli in superficie considerando l'interfaccia suolo/atmosfera, quindi gli sforzi della ricerca futura potrebbero essere incanalati in questa direzione. Le investigazioni future potrebbero avere l'obiettivo di capire meglio l'interconnessione tra i processi superficiali come il vento, le forze di turbolenza e i cambiamenti di pressione barometrica e i processi che si svolgono nel sottosuolo.*

Buona regola sarebbe quella di confrontare le misure delle emissioni relative ad una data discarica ottenute con due o più metodi di indagine. Tale passo non viene quasi mai fatto e nei rari casi in cui si può far riferimento a misure ricavate con più tecniche esse si riferiscono solo al metano (Galle et al., 1998; Savanne et al., 1998), mentre si potrebbero avere dei dati confrontabili su tutti i tipi di emissioni (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S e NMOC's).

---

<sup>9</sup> NMOC's acronimo inglese di "non methane organic compounds".